

**STUDI SIMULASI PENAMBAHAN SIRIP VERTIKAL PADA TURBIN
SAVONIUS L MENGGUNAKAN PEMODELAN CFD DUA DIMENSI**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik**



**Disusun oleh:
SATRIO TRI JAYANTO
I0414045**

**JURUSAN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SEBELAS MARET
SURAKARTA
2018**



KEMENTERIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS SEBELAS MARET - FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN

Jl Ir Sutami No. 36A Ketingan Surakarta Telp. 0271 632163 web: mesin.ft.uns.ac.id

**SURAT TUGAS PEMBIMBING DAN PENGUJI TUGAS AKHIR
PROGRAM SARJANA TEKNIK MESIN UNS**

Program Studi : **S1 Teknik Mesin**

Nomor : **0853/TA/S1/07/2018**

Nama : **Satrio Tri Jayanto**
NIM : **I0414045**
Bidang : **Konversi Energi**
Pembimbing 1 : **D. DANARDONO, ST, MT, PhD/196905141999031001**
Pembimbing 2 : **Sukmaji Indro Cahyono, ST, MEng/198308182014041001**
Penguji : **1. DR. ZAINAL ARIFIN, S.T., M.T./ 197303082000031001**
2. R. LULUS LAMBANG, ST,MT/ 197207052000121001

Mata Kuliah Pendukung

1. **Aero dan Hidro Dinamika(MS06033-15)**
2. **Turbin(MS04043-15)**
3. **CFD(MS06073-15)**

Judul Tugas Akhir

**"Studi Simulasi Penambahan Sirip Vertikal pada
Turbin Savonius L Menggunakan Pemodelan CFD 2
Dimensi"**



Surakarta, 2018-07-12 16:04:19
Kepala Program Studi S1 Teknik Mesin,

DR. ENG. SYAMSUL HADI, ST, MT
NIP. 197106151998021002

Tembusan :

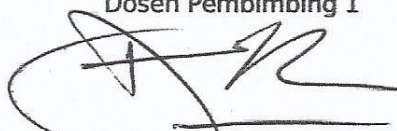
1. Mahasiswa ybs.
2. Dosen Pembimbing TA ybs.
3. Koordinator TA.
4. Arsip.

**Studi Simulasi Penambahan Sirip Vertikal pada Turbin Savonius L
Menggunakan Pemodelan CFD 2 Dimensi**

Disusun Oleh


Satrio Tri Jayanto
NIM : 10414045

Dosen Pembimbing 1



D. DANARDONO, ST, MT, PhD
NIP. 196905141999031001

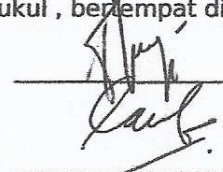
Dosen Pembimbing 2

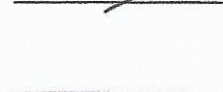


Sukmaji Indro Cahyono, ST, MEng
NIP. 198308182014041001

Telah dipertahankan di depan Tim Dosen Penguji pada tanggal , pukul , bertempat di .

1. DR. ZAINAL ARIFIN, S.T., M.T.
197303082000031001
2. R. LULUS LAMBANG, ST,MT
197207052000121001
- 3.



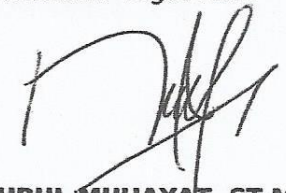


Kepala Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret
Surakarta



DR. ENG. SYAMSUL HADI, ST,MT
NIP. 197106151998021002

Koordinator Tugas Akhir



DR. NURUL MUHAYAT, ST,MT
NIP. 197003231998021001

PERNYATAAN INTEGRITAS PENULIS

Dengan ini saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa dalam laporan tugas akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan sepanjang sepengetahuan saya, tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali tertulis diacu dalam laporan ini dan disebutkan dalam daftar pustaka. Jika terdapat hal-hal yang tidak sesuai dengan ini, maka saya bersedia dikenai sanksi dengan peraturan yang berlaku.

Surakarta, 23 Oktober 2018

Satrio Tri Jayanto

ABSTRAK

STUDI SIMULASI PENAMBAHAN SIRIP VERTIKAL PADA TURBIN SAVONIUS L MENGGUNAKAN PEMODELAN CFD DUA DIMENSI

Satrio Tri Jayanto

Program Studi Teknik Mesin

Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

Surakarta, Indonesia

Email: satriotrijayanto@gmail.com

Energi terbarukan merupakan sumber energi listrik yang semakin berkembang seiring dengan menipisnya bahan bakar fosil. Turbin angin *savonius* L merupakan mesin untuk mengestrak energi angin menjadi energi listrik dengan keuntungan dapat bekerja pada kecepatan angin yang rendah serta konstruksi perawatannya mudah dan murah. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh penambahan sirip vertikal terhadap kinerja turbin *savonius* L menggunakan simulasi ANSYS (2D). Variasi yang digunakan adalah turbin tanpa sirip, turbin penambahan satu sirip, turbin penambahan dua sirip dan TSR (*Tip Speed Ratio*) 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2. Metode simulasi dikembangkan dan divalidasi menggunakan model turbulensi *k-ε realizable* yang akurat untuk simulasi dengan rotasi, separasi pada kecepatan angin rendah. Hasilnya terjadi peningkatan koefisien daya turbin angin *savonius* L sebesar 7,60% untuk turbin dengan penambahan dua sirip dan 8,81% untuk turbin penambahan satu sirip jika dibandingkan dengan tanpa penambahan sirip.

Kata kunci: turbin angin, *savonius* L, CFD, sirip vertikal, *Tip Speed Ratio*, koefisien daya

ABSTRACT

A SIMULATION STUDY OF ADDING VERTICAL FIN IN L-TYPE SAVONIUS WIND TURBINE USING TWO DIMENSIONAL CFD MODELING

Satrio Tri Jayanto

Mechanical Engineering Department

Faculty of Engineering, University of Sebelas Maret

Surakarta, Indonesia

Email: satriotrijayanto@gmail.com

Renewable energy is a source of electrical energy that has been widely developed along with the depletion of fossil fuels. L-type savonius wind turbine is one of machine to extract wind energy into electrical energy with the advantage of being able to work at low wind speeds. Also, it is easy and required a low cost requirement for maintain the construction. The objective of this research is to study the effect of adding vertical fins to the performance of L-type savonius wind turbine by using ANSYS (2D) simulation. Variations used in this study were turbine without fins, turbine with one fin, and turbine with two fins. These variations were simulated with TSR (Tip Speed Ratio) 0.4; 0.6; 0.8; 1.0; 1.2. The simulation method was developed and validated by using realizable $k-\epsilon$ turbulence model for simulation with rotation and separation at low wind speeds. The result of this study shows an increase of power coefficient of L-type savonius wind turbine. The power coefficient increase by 7.60% for turbine with two fins addition and 8.81% for turbine with one fin addition, compared to the turbine without the addition of fins.

Keywords: wind turbine, L-type savonius, CFD, vertical fin, Tip Speed Ratio, power coefficient

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul “Studi Simulasi Penambahan Sirip Vertikal pada Turbin Savonius L Menggunakan Pemodelan CFD Dua Dimensi” dengan baik. Laporan tugas akhir ini disusun guna memenuhi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di program studi Teknik Mesin di Universitas Sebelas Maret.

Penyusunan laporan tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan bantuan, berupa saran, dorongan, serta masukan dari berbagai pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, pada kesempatan kali ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan laporan ini, antara lain:

1. Bapak Dr. Eng. Syamsul Hadi, S.T., M.T., selaku kepala program studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret.
2. Bapak D. Danardono Dwi Prija T, S.T., M.T., Ph.D., selaku Pembimbing I yang senantiasa memberikan ilmu, bimbingan, arahan, serta nasihat dalam menyelesaikan tugas akhir.
3. Bapak Sukmaji Indro Cahyono, S.T., M.Eng., selaku Pembimbing II yang telah turut serta memberikan ilmu, bimbingan, arahan, serta nasihat dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Zainal Arifin, S.T., M.T. dan Bapak R. Lulus Lambang Govinda Hidajat, S.T, M.T., selaku dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan masukan dan saran yang membangun.
5. Seluruh Dosen serta Staff program studi Teknik Mesin Universitas Sebelas Maret, yang telah turut membimbing dan memberikan ilmu kepada penulis hingga dapat menyelesaikan tugas akhir.
6. Bapak Sugiharto, S.Pd dan Ibu Titin Gusmiyarti, S.Pd, selaku orang tua penulis yang selalu memberikan doa restu, memotivasi, mendukung penulis dalam menjalani perkuliahan hingga dapat menyelesaikan tugas akhir, serta selalu setia mengiringi penulis dalam meraih cita-cita.

7. Desta Setiyowati selaku teman spesial yang selalu mendukung, memotivasi selama mengerjakan tugas akhir dan menghibur dikala penat dari tugas akhir.
8. Dio Afinanda Makarim dan Setyo Yoga Pebriansyah selaku teman seperjuangan yang selalu sabar mendengarkan keluh kesah penulis dan memotivasi penulis hingga dapat menyelesaikan tugas akhir.
9. Teman-teman Teknik Mesin angkatan 2014 “MEXIV” yang memberikan dukungan dan menemani selama 4 tahun menjalani perkuliahan.
10. Teman-teman mahasiswa Teknik Mesin UNS dari berbagai angkatan yang senantiasa selalu memberi semangat dan bantuan.
11. Kakak tingkat Teknik Mesin UNS, M. Ivan Fadhil, Andy Anzi, Eghi Maulana yang selalu mendukung penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
12. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan laporan tugas akhir ini, yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan yang ada pada laporan tugas akhir ini. Oleh karena itu penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang membangun dari pembaca, mengingat laporan tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Akhir kata, penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini bermanfaat bagi penulis maupun pembaca.

Surakarta, 23 Oktober 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN SURAT PENUGASAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN INTEGRITAS PENULIS.....	iv
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR RUMUS	xiv
DAFTAR NOTASI	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
1.6. Sistematika Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	4
2.1. Tinjauan Pustaka	4
2.2. Dasar Teori	6
2.2.1. Energi angin.....	6
2.2.2. Turbin angin.....	6
2.2.3. Turbin angin <i>savonius</i>	9
2.2.4. Prinsip konversi energi angin	10
2.2.5. Teori momentum Elementer Betz.....	11
2.2.6. <i>Tip Speed Ratio</i>	15
2.2.7. Koefisien daya dan koefisien torsi.....	16
2.2.8. <i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i>	17

2.2.9. <i>Meshing</i>	18
2.2.10. Persamaan dasar <i>CFD</i>	19
BAB III METODE PENELITIAN	23
3.1. Tempat Penelitian	23
3.2. Alat dan Instrumen Penelitian	23
3.3. Parameter Penelitian	23
3.4. Domain Komputasi	24
3.5. <i>Meshing</i>	25
3.6. Kondisi Batas	25
3.7. Diagram Alir Penelitian	26
3.8. Prosedur Penelitian	27
BAB IV DATA DAN ANALISA	30
4.1. Validasi Penelitian	30
4.2. Pemodelan Turbin Angin <i>Savonius</i> L Dengan Variasi Sirip Vertikal	33
4.3. Analisa Vektor dan Kontur Kecepatan Turbin Angin <i>Savonius</i> L	37
BAB V PENUTUP	43
5.1. Kesimpulan	43
5.2. Saran	43
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Perbandingan Karakteristik dan Performansi HAWTs dan VAWTs.....	9
Tabel 2.2. Skala Kualitas <i>Meshing</i>	18
Tabel 2.3. Kelebihan dan Kelemahan Model Turbulensi CFD.....	20
Tabel 3.1. Spesifikasi Laptop yang Digunakan	23
Tabel 3.2. Parameter yang Digunakan dalam Simulasi Turbin Angin <i>Savonius</i> ..	23
Tabel 4.1. Nilai <i>Error</i> Hasil Validasi Jurnal dan Hasil Pemodelan	33
Tabel 4.2. Geometri Turbin.....	33
Tabel 4.3. Hasil Simulasi Turbin Angin <i>Savonius</i> L	34

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Turbin Angin Jenis <i>Drag</i> dan <i>Lift</i>	6
Gambar 2.2. Konfigurasi Rotor HAWTs	8
Gambar 2.3. Jenis Turbin Angin Vertikal, (a) <i>Savonius</i> Rotor, (b) <i>Daerius</i> rotor, (c) <i>H-Rotor</i> , (d) <i>Cross-flow</i>	9
Gambar 2.4. Prinsip Kerja Turbin Angin <i>Savonius</i>	10
Gambar 2.5. Kondisi Aliran Ekstraksi Energi Mekanik dari Aliran Udara Bebas .	11
Gambar 2.6. Koefisien Daya Terhadap Rasio Kecepatan Aliran Udara.....	14
Gambar 2.7. Nilai C_p dan <i>Tip Speed Ratio</i> untuk Berbagai Turbin Angin	15
Gambar 2.8. Nilai C_m dan <i>Tip Speed Ratio</i> untuk Berbagai Turbin Angin	16
Gambar 3.1. <i>Domain</i> Pemodelan Turbin Angin <i>Savonius</i>	24
Gambar 3.2. <i>Meshing</i> pada Sudu Turbin <i>Savonius</i>	24
Gambar 3.3. Diagram Alir Penelitian	27
Gambar 3.4. Variasi (a) Tanpa Sirip Vertikal (b) 1 Sirip Vertikal (c) 2 Sirip Vertikal.....	28
Gambar 4.1. Geometri Turbin Angin <i>Savonius</i> L.....	30
Gambar 4.2. <i>Domain</i> Pemodelan Turbin Angin <i>Savonius</i> L.....	31
Gambar 4.3. <i>Meshing</i> Hasil Simulasi.....	31
Gambar 4.4. Grafik Nilai C_m (Koefisien Torsi) dari Sukanta Roy dan Hasil Pemodelan	32
Gambar 4.5. Konfigurasi variasi (a) tanpa sirip vertikal (b) 1 sirip vertikal, dan (c) 2 sirip vertikal	34
Gambar 4.6. Hubungan C_m dengan TSR pada Variasi Jumlah Sirip Vertikal	36
Gambar 4.7. Hubungan C_p dengan TSR pada Variasi Jumlah Sirip Vertikal	36
Gambar 4.8. Kontur Kecepatan Turbin <i>Savonius</i> L dengan variasi: (a) Tanpa sirip vertikal (b) 1 sirip vertikal, dan (c) 2 sirip vertika	38
Gambar 4.9. Kontur Kecepatan Turbin Angin <i>Savonius</i> Konvensional dan Modifikasi Baru	39
Gambar 4.10. Kontur Intensitas Turbulensi Turbin <i>Savonius</i> L dengan variasi: (a) Tanpa sirip vertikal (b) 1 sirip vertikal, dan (c) 2 sirip vertikal	40

Gambar 4.11. Variasi Koefisien Torsi Terhadap Sudut Rotasi Turbin Angin	
<i>Savonius</i> L	41
Gambar 4.12. Variasi Koefisien Torsi Terhadap Sudut Rotasi Turbin Angin	
<i>Savonius</i> Konvensional.....	42
Gambar 4.13. Posisi Garis Pengambilan Data Kecepatan	43
Gambar 4.14. Hubungan Kecepatan Angin dengan Jarak dari Pusat Turbin.....	43

DAFTAR RUMUS

Persamaan 2.1. Energi Kinetik.....	10
Persamaan 2.2. Energi Kinetik Aliran Udara.....	10
Persamaan 2.3. Daya Aliran Udara.....	11
Persamaan 2.4. Persamaan Kontinuitas	11
Persamaan 2.5. Volume Udara Tiap Satuan Waktu.....	11
Persamaan 2.6. Laju Aliran Massa.....	12
Persamaan 2.7. Daya Melewati Penampang Rotor	12
Persamaan 2.8. Energi Mekanik Tiap Satuan Waktu.....	12
Persamaan 2.9. Daya Mekanik dari Angin	12
Persamaan 2.10. Gaya yang Bekerja pada Turbin	13
Persamaan 2.11. Daya yang Diperlukan untuk Menghambat Aliran Udara.....	13
Persamaan 2.12. Kecepatan Aliran Udara pada Rotor.....	13
Persamaan 2.13. Laju Aliran Massa pada Turbin	13
Persamaan 2.14. Daya Mekanik Output Turbin Angin.....	13
Persamaan 2.15. Daya yang Melewati Penampang Rotor	13
Persamaan 2.16. Koefisien Daya	13
Persamaan 2.17. Penyederhanaan Persamaan Koefisien Daya.....	14
Persamaan 2.18. <i>Tip Speed Ratio</i>	15
Persamaan 2.19. Nilai Koefisien Torsi	16
Persamaan 2.20. Nilai Koefisien Daya	16
Persamaan 2.21. Hubungan Koefisien Daya Koefisien Torsi dan TSR.....	17
Persamaan 2.22. Persamaan Kontinuitas 2D.....	19
Persamaan 2.23. Persamaan Kontinuitas <i>incompressible</i> 2D	19
Persamaan 2.24. Persamaan <i>Incompressible Navier-Stokes</i> 2D	20
Persamaan 2.25. Persamaan k kondisi aliran <i>steady</i> dan <i>incompressible</i>	21
Persamaan 2.26. Persamaan ϵ kondisi aliran <i>steady</i> dan <i>incompressible</i> ...	22

DAFTAR NOTASI

λ	:	<i>tip speed ratio</i>	(non-dimensional)
D	:	diameter rotor	(m)
n	:	putaran rotor	(rpm)
v	:	kecepatan fluida	(m/s)
C_p	:	koefisien daya	(non-dimensional)
P	:	daya	(Watt)
ρ	:	massa jenis fluida	(kg/m ³)
S	:	luas penampang area	(m ²)
C_m	:	koefisien torsi	(non-dimensional)
A	:	Luas area sapuan rotor	(m ²)
T	:	Torsi	(Nm)
\dot{m}	:	<i>Laju Aliran Massa</i>	(kg/s)
v	:	Kecepatan angin	(m/s)
v'	:	Kecepatan aliran udara pada rotor	(m/s)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dewasa ini, sumber bahan bakar fosil untuk kelistrikan semakin menipis. Selain itu, kebutuhan listrik yang dibutuhkan masyarakat semakin meningkat. Hal tersebut berdampak pada kekurangannya daya listrik dan biaya listrik yang semakin meningkat. Di sisi lain pemanfaatan sumber energi terbarukan semakin berkembang. Pencemaran lingkungan berkurang dan udara semakin sehat. Selain itu pemanfaatan energi angin secara maksimal diharapkan dapat menjaga ketahanan serta kemandirian energi nasional. Wilayah Indonesia memiliki kecepatan angin yang relatif rendah, berkisar antara 3-6 m/s. Hanya di beberapa wilayah Indonesia saja yang memiliki kecepatan di atas 5 m/s yaitu di NTB (Nusa Tenggara Barat), NTT (Nusa Tenggara Timur), dan pantai selatan pulau Jawa. Potensi tenaga angin di nusantara diperkirakan 60 GW, namun baru dimanfaatkan 3,1 MW [1].

Dari data yang didapatkan, diperlukan sebuah alat yang digunakan untuk memanfaatkan energi angin menjadi energi listrik supaya memaksimalkan potensi energi angin di Indonesia. Turbin angin merupakan alat yang digunakan untuk mengekstrak energi kinetik angin menjadi energi listrik. Pada skala besar, terdapat jenis turbin angin HAWTs (*Horizontal Axis Wind Turbines*) yang memiliki transmisi daya sangat besar. Namun HAWTs hanya memberikan efisiensi besar pada kecepatan angin tinggi [2]. Selain HAWTs terdapat turbin angin jenis VAWTs. Dibandingkan dengan HAWTs, keuntungan paling signifikan dari *Vertical Axis Wind Turbines* (VAWTs) adalah dapat menerima energi angin dari segala arah dengan efisiensi yang lebih tinggi. Selain itu, VAWTs dapat di pasang di gedung tinggi dan dijadikan sumber listrik untuk lampu jalan kota [3]. Kelebihan lain dari VAWTs adalah instalasi, perawatan, dan pembuatan yang mudah. Dengan karakteristik VAWTs tersebut, perlu dilakukan berbagai upaya untuk meningkatkan efisiensi dari turbin angin tipe VAWTs, khususnya pada turbin angin *savonius*. Salah satu bagian terpenting dari sebuah turbin angin adalah rotor [4].

Pemodifikasian rotor turbin angin dilakukan agar turbin dapat mengekstrak energi angin secara maksimal, sehingga menghasilkan daya listrik yang maksimal.

Pada awalnya rotor *savonius* konvensional berbentuk U. Semakin berkembangnya ilmu pengetahuan, para ilmuwan mengembangkan bentuk rotor *savonius*. Rotor *savonius* L (*bach-type*) merupakan modifikasi pengembangan dari rotor *savonius* U.

Sukanta Roy [5] melakukan penelitian mengenai pengaruh *blade arc angle* pada *savonius* L, hasilnya pada *blade arc angle* yang berbeda menghasilkan koefisien daya turbin yang berbeda. Penelitian Shonu Sharma [6] menunjukkan bahwa penambahan *multiple quarter blades* berpengaruh pada koefisien daya turbin *savonius*. Selain itu kecepatan angin yang berbeda dapat mempengaruhi koefisien daya yang dihasilkan turbin angin *savonius*.

Berdasarkan beberapa inovasi pemodifikasian turbin angin sebelumnya, perlu adanya inovasi baru yang diharapkan agar kinerja turbin angin *savonius* semakin maksimal. Di dalam penelitian ini akan dilakukan pengujian simulasi numerik pada turbin *savonius* tipe L dengan penambahan sirip vertikal. Penelitian akan dilakukan dengan metode simulasi 2 dimensi menggunakan software ANSYS-Fluent.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun permasalahan yang akan di bahas pada tugas akhir ini berdasarkan latar belakang tersebut, adalah:

1. Bagaimana pengaruh *Tip Speed Ratio* (TSR) terhadap koefisien daya turbin angin *savonius* L?
2. Bagaimana pengaruh penambahan sirip vertikal terhadap koefisien daya turbin angin *savonius* L?

1.3. Batasan Masalah

Melihat ruang lingkup yang sangat luas, maka analisa masalah pada tugas akhir ini dibatasi pada hal hal berikut:

1. Penelitian dilakukan dengan simulasi menggunakan *software* ANSYS *Fluent*.
2. Simulasi dilakukan secara 2D.
3. Diameter turbin *savonius* dijaga konstan.
4. Fluida kerja (udara) dianggap *incompressible*, dengan aliran turbulen.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh *Tip Speed Ratio* (TSR) terhadap koefisien daya turbin angin *savonius* L.
2. Mengetahui bagaimana pengaruh penambahan sirip vertikal terhadap koefisien daya turbin angin *savonius* L.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Menjadi referensi pengembangan turbin angin untuk daerah dengan kecepatan angin rendah (3-6 m/s).
2. Memberi pengetahuan tentang pengaruh *Tip Speed Ratio* (TSR) dan penambahan sirip vertikal terhadap koefisien daya yang dihasilkan turbin angin *savonius* L.
3. Menjadi referensi untuk mengembangkan turbin angin tipe *savonius* L.

1.6. Sistematika Penyusunan

Sistematika dalam penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I: Pendahuluan, berisi tentang latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan.

BAB II: Landasan teori, berisi tentang pendekatan teoritis serta tinjauan pustaka yang berkaitan dengan turbin angin jenis *savonius*, dan *Computational Fluid Dynamic* (CFD).

BAB III: Metodologi penelitian, berisi tentang alat penelitian, serta tata cara pelaksanaan penelitian.

BAB IV: Hasil dan pembahasan, berisi data hasil penelitian (simulasi) serta perhitungan dan analisa data hasil.

BAB V: Penutup, berisi tentang kesimpulan dan saran.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Perkembangan pemanfaatan tenaga angin pada saat ini sangat pesat. Para peneliti dengan berbagai inovasi melakukan percobaan untuk terus meningkatkan kinerja turbin angin. Turbin angin *savonius* merupakan salah satu jenis turbin angin VAWT. Turbin angin *savonius* pertama kali diperkenalkan dan dikembangkan oleh Sigurd Johaness Savonius pada tahun 1922.

Kamoji [7] melakukan penelitian eksperimen yaitu membandingkan kinerja turbin angin *savonius* dengan rotor *single stage*, *two stage* dan *three stage*. Penelitian dilakukan dengan Reynold number sama yakni pada Re 100.000. Hasil yang didapat rotor *single stage* memiliki $C_{p_{max}}$ lebih besar dibanding *two stage* maupun *three stage*. Rotor *single stage* memiliki $C_{p_{max}}$ sebesar 16,1% pada TSR 0,78. Rotor *two stage* memiliki $C_{p_{max}}$ sebesar 14,5% pada TSR 0,83. Sedangkan, rotor *three stage* memiliki $C_{p_{max}}$ sebesar 13,2% pada TSR 0,77.

Akwa [8] menganalisis pengaruh *overlap ratio* terhadap koefisien daya rotor angin *savonius*. *Overlap ratio* yang digunakan adalah 0; 0,15; 0,30; dan 0,45. Hasil yang diperoleh yaitu penambahan *overlap ratio* dapat meningkatkan koefisien daya dari turbin angin *savonius*. Koefisien daya maksimal tertinggi pada *overlap ratio* 0,15 dengan koefisien daya rata-rata sebesar 0,3161 pada TSR 1,25.

Ramadan [9] melakukan simulasi numerik menggunakan CFD. Dalam penelitiannya, jumlah sudu turbin angin *savonius* dibandingkan. Variasi yang dibandingkan yakni rotor dengan 2 sudu dan 3 sudu. *Overlap ratio* dan kecepatan angin yang digunakan sama yaitu 0,2 dan 6,5 m/s. Hasil yang diperoleh yaitu rotor dengan 2 sudu memiliki efisiensi daya yang terbesar. Rotor 2 sudu memiliki efisiensi daya sebesar 14%, sedangkan rotor 3 sudu memiliki efisiensi daya 11%. Turbin angin *savonius* L merupakan teknologi modifikasi turbin angin *savonius* konvensional U yang sudunya menyerupai bentuk huruf “L”.

Kamoji [10] telah melakukan eksperimen dengan membandingkan tiga jenis desain sudu turbin yakni, sudu rotor konvensional, modifikasi sudu rotor (rotor L) tanpa menggunakan poros, dan modifikasi sudu rotor menggunakan poros.

Hasilnya menunjukkan bahwa modifikasi rotor *savonius* tanpa poros memiliki koefisien daya tertinggi diikuti oleh rotor *savonius* konvensional dan rotor *savonius* yang dimodifikasi dengan poros. Koefisien daya maksimum *savonius* yang dimodifikasi (tanpa poros) = 0,21 pada TSR (*Tip Speed Ratio*) = 0,69. Koefisien daya maksimum *savonius* konvensional = 0,175 pada TSR = 0,69. Koefisien daya maksimum *savonius* yang dimodifikasi (dengan poros) = 0,143 pada TSR = 0,64.

Konrad Kacprzak [11] melakukan penelitian simulasi numerik dengan membandingkan antara rotor konvensional, rotor *ellips* dan rotor L dengan analisis 2D CFD. Parameter simulasi dilakukan pada TSR dari 0,2 sampai 1,2. Hasilnya semua rotor memiliki koefisien daya maksimum pada TSR 0,8. Rotor konvensional memiliki koefisien daya sebesar 0,17; rotor *ellips* sebesar 0,29 dan rotor L sebesar 0,34. Sedangkan koefisien daya rata-rata rotor *savonius* L adalah 0,26.

Sukanta Roy [5] melakukan penelitian mengenai efek *blade arc angles* (Φ) dalam desain modifikasi turbin angin *savonius* L dengan menggunakan 2D CFD. Parameter yang digunakan blade gap 10% dari panjang *chord*, *arc radius* 42% dari panjang *chord*, *overlap distance* 40% dari panjang *chord*, dengan kecepatan konstan 6,31 m/s. *Blade arc angles* divariasikan dari $\Phi = 90^\circ$ sampai 165° . Koefisien daya dihitung pada TSR = 0,2 sampai 1,4. Hasilnya didapatkan desain VAWT yang optimum pada $\Phi = 135^\circ$ dengan menghasilkan koefisien daya rata-rata sebesar 0,34.

Selain dengan memodifikasi bentuk sudu turbin *savonius*, ada cara lain untuk meningkatkan kinerja dari turbin *savonius*. Penambahan sirip verikal yang dipasang sejajar dengan sudu akan membuat aliran angin yang melewati sudu semakin halus. Sonu Sharma [6] melakukan penelitian mengenai studi perbandingan hasil kinerja antara rotor *savonius* konvensional dan konfigurasi rotor *savonius* baru yang memiliki *multiple quarter blades* menggunakan 2D CFD. Hasilnya konfigurasi baru memiliki kinerja yang lebih baik daripada konfigurasi konvensional untuk semua kasus kecepatan angin yang berbeda. Hasil nilai COP maksimum yaitu 0,2266 untuk $v = 8,23$ m/s dengan peningkatan 8,89% dari konfigurasi konvensional.

2.2. Dasar Teori

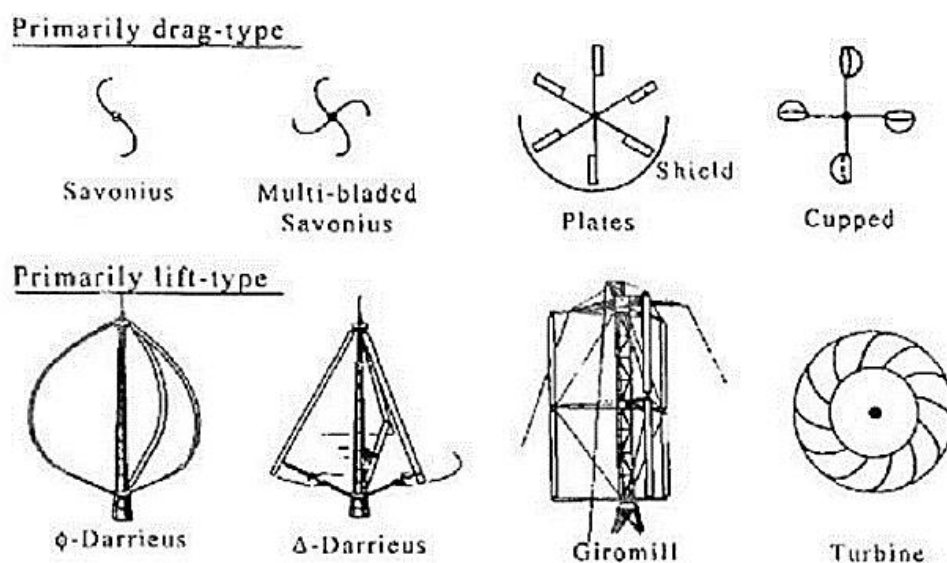
2.2.1. Energi angin

Angin merupakan sumber energi tak terbatas yang tersedia di seluruh dunia. Angin merupakan salah sumber enegi yang bersih dan dapat terbarukan, sehingga bisa dikatakan ramah lingkungan. Angin merupakan udara yang bergerak dari tekanan udara yang lebih tinggi menuju tekanan udara yang lebih rendah. Angin juga dapat dipengaruhi suhu, yakni bergerak dari suhu panas ke suhu yang lebih rendah. Energi angin dapat menghasilkan listrik dengan menggunakan sebuah alat yang dinamakan turbin angin. Oleh karena itu, turbin angin dapat disebut sebagai SKEA (Sistem Konversi Energi Angin) [12].

2.2.2. Turbin angin

Turbin angin adalah piranti teknologi yang dapat memproduksi energi listrik. Turbin angin dapat menghasilkan listrik dengan menggunakan tenaga angin untuk menggerakkan generator listrik. Angin melewati rotor, menghasilkan gaya angkat, rotor yang berputar menggerakkan poros, yang masuk ke *gearbox*. *Gearbox* mengonversi kecepatan rotasi yang sesuai untuk generator. Kemudian generator dengan menggunakan medan magnet digunakan untuk mengubah energi rotasi menjadi energi listrik [13].

Berdasarkan prinsip gaya aerodinamik, turbin angin dapat digolongkan menjadi 2 jenis, yakni: *lift* dan *drag*.



Gambar 2.1. Turbin Angin Jenis *Drag* dan *Lift* [14].

1. Turbin angin jenis *lift*

Turbin angin jenis *lift* memiliki prinsip kerja yaitu memanfaatkan *lift* atau gaya angkat.

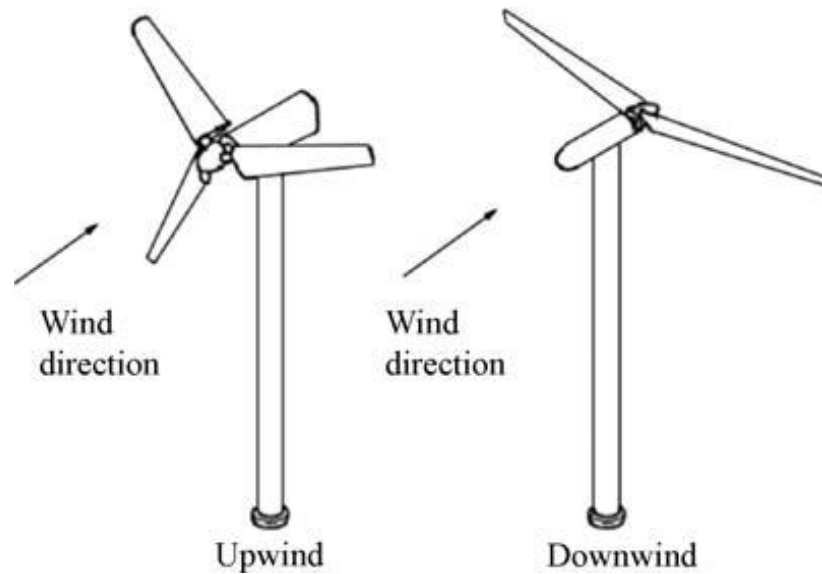
2. Turbin angin jenis *drag*

Turbin angin jenis *drag* memiliki prinsip kerja yaitu memanfaatkan *drag* atau gaya hambat.

Pada penelitian ini, turbin *savonius* merupakan turbin angin dengan jenis drag. Turbin *savonius* memanfaatkan perbedaan gaya drag antara bagian *convex* (cembung) dan *concave* (cekung). Namun pada saat posisi sudut rotor tertentu, gaya angkat juga berpengaruh pada torsi yang dihasilkan [15]. Berdasarkan arah sumbu gerak, turbin angin dibagi menjadi dua tipe yaitu turbin angin sumbu *horizontal* dan turbin angin sumbu vertikal [16].

1. Turbin angin sumbu *horizontal*

Turbin angin sumbu *horizontal* merupakan turbin angin dengan bilah rotor terhubung dengan poros *horizontal*. Turbin semacam ini banyak digunakan untuk aplikasi komersial. *Gear box* dan generator turbin terpasang *horizontal* terhadap poros turbin sedangkan transformator turbin terletak di bawah tiang penyangga turbin. Turbin angin sumbu *horizontal* memiliki desain rotor *upwind* (rotor berhadapan langsung terhadap arah angin) atau rotor *downwind* (rotor membelakangi terhadap arah angin). Rotor *upwind* lebih bising dibandingkan dengan rotor *downwind*. Kelebihan turbin angin sumbu *horizontal* adalah memiliki efisiensi tinggi dan *cut in* rendah [17]. Sedangkan kekurangan dari turbin angin sumbu *horizontal* adalah instalasi yang sulit, biaya *maintenance*/perawatan mahal, serta rotor membutuhkan mekanisme *yaw* atau pengarah, karena tidak dapat menerima dari berbagai arah angin [18]. Jenis-jenis turbin angin sumbu *horizontal* berdasarkan jumlah sudu ditunjukkan pada Gambar 2.2.



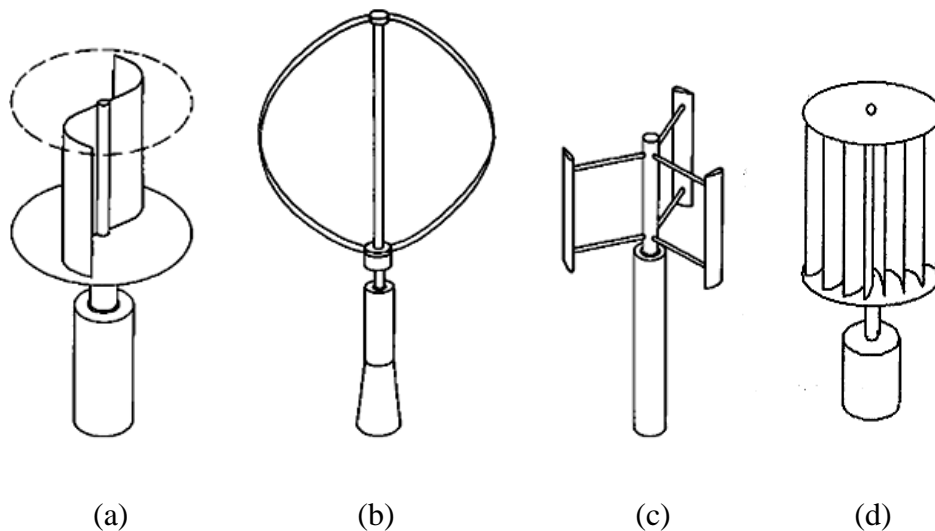
Gambar 2.2. Konfigurasi Rotor HAWTs [18].

2. Turbin angin sumbu vertikal

Turbin angin sumbu vertikal merupakan turbin angin yang sumbu rotasi rotornya tegak lurus terhadap permukaan tanah. Alasan utama akhir-akhir ini para peneliti mengembangkan VAWTs adalah karena dapat mengonversi udara dari berbagai arah. VAWTs tidak membutuhkan mekanisme yaw sehingga biaya instalasi tidak semahal HAWTs. Selain itu instalasi dan perawatan turbin angin sumbu vertikal mudah. Lebih lagi, suara yang dihasilkan tidak sebisng turbin angin sumbu *horizontal*. Maka dari itu, VAWTs cocok dan dapat diterima untuk daerah perkotaan [19].

VAWTs dibanding HAWTs memiliki efisiensi lebih rendah. VAWT dapat diaplikasikan atau digunakan untuk instalasi berkapasitas besar, namun material yang diperlukan sangat banyak, sehingga biaya yang dikeluarkan pun otomatis akan mahal [17]. Sehingga, turbin angin sumbu vertikal cocok digunakan pada penggunaan skala kecil. Turbin angin sumbu vertikal dapat bekerja pada kecepatan angin yang rendah, berbeda dengan turbin angin sumbu *horizontal* yang membutuhkan kecepatan angin yang cukup tinggi. Lain jika HAWTs tidak bisa bekerja pada kondisi angin turbulen, kondisi fluktuasi, dan dari berbagai arah, VAWTs dapat bekerja pada kondisi tersebut. Ada beberapa jenis turbin angin sumbu vertikal. Di bawah ini merupakan jenis turbin angin

sumbu vertikal, antara lain: turbin angin *savonius*, turbin angin *daerius*, turbin angin *H-rotor*, dan turbin angin *cross-flow*.



Gambar 2.3. Jenis Turbin Angin Vertikal, (a) *Savonius Rotor*, (b) *Daerius rotor*, (c) *H-Rotor*, (d) *Cross-flow* [20].

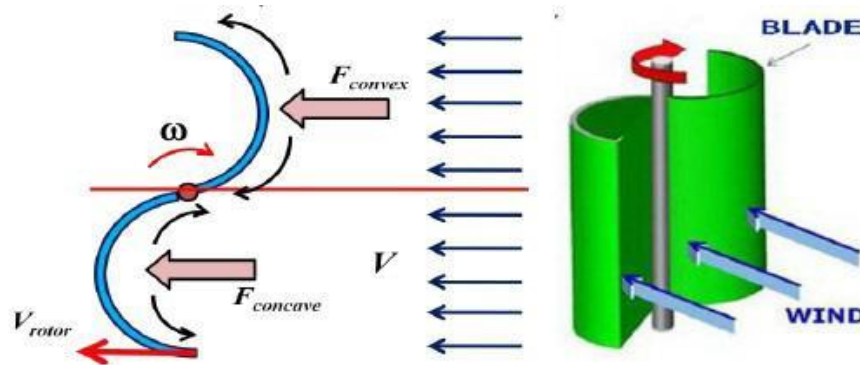
Tabel 2.1. Perbandingan Karakteristik dan Performansi HAWTs dan VAWTs [21].

	HAWTs	VAWTs
Bentuk tower	Besar	Kecil
Mekanisme yaw	Ya	Tidak
Pemasangan	Rumit	Sederhana
Tinggi dari tanah	Tinggi	Rendah
Ruang rotor beroperasi	Besar	Kecil
Kebisingan	Tinggi	Rendah
Arah angin	Bergantung	Tidak bergantung

2.2.3. Turbin Angin *Savonius*

Turbin angin *savonius* merupakan sebuah mesin fluida yang memiliki sumbu poros vertikal yang diciptakan oleh seorang insinyur Finlandia bernama Sigurd Johaness Savonius pada tahun 1922. Turbin *savonius* menggunakan sistem *drag* untuk mendorong *blade* sehingga menghasilkan torsi yang akan membuat putaran rotor. Bentuk sudu turbin angin *savonius* paling sederhana dibandingkan dengan desain sudu dari VAWTs dan HAWTs lainnya, sehingga lebih mudah untuk

merancanganya dan harganya murah dibanding pemasangan turbin VAWTs lainnya. Selain itu, turbin angin *savonius* dapat beroperasi pada arah angin yang beragam. Keunggulan lainnya yaitu turbin angin *savonius* memiliki torsi awal yang baik pada kecepatan angin rendah dibanding turbin angin lainnya. Prinsip kerja turbin angin *savonius* sangat sederhana. Turbin berputar karena perbedaan gaya *drag* yang bekerja pada bagian cekung dan cembung pada rotornya.



Gambar 2.4. Prinsip Kerja Turbin Angin *Savonius* [19].

2.2.4. Prinsip konversi energi angin

Energi kinetik aliran udara dapat ditulis dengan persamaan:

$$E = \frac{1}{2} mv^2 \quad (2.1)$$

Dimana:

m : massa udara yang bergerak (kg)

v : adalah kecepatan angin (m/s)

Energi kinetik yang terkandung dalam angin inilah yang ditangkap oleh turbin angin untuk memutar rotor. Energi kinetik yang tersedia dari aliran udara pada turbin dapat dirumuskan:

$$E = \frac{1}{2} \rho_a vV^2 \quad (2.2)$$

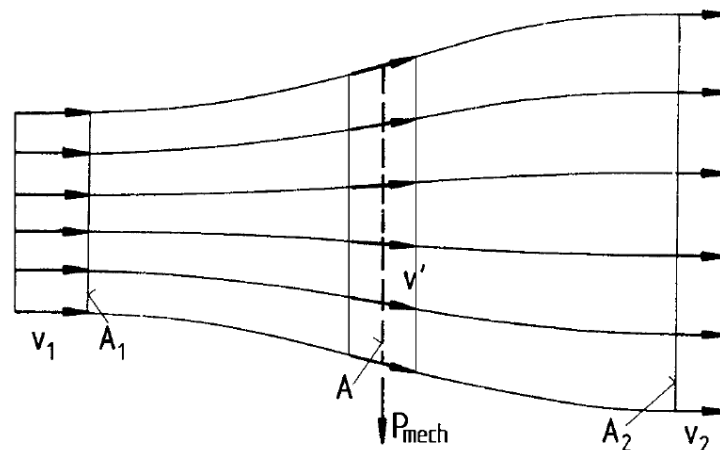
Dimana ρ_a adalah densitas udara, dan v adalah volume udara yang terdapat pada rotor. Aliran udara yang bersentuhan dengan rotor per satuan waktu memiliki luas penampang yang sama dengan luas penampang rotor tersebut (A_T) dan ketebalannya sama dengan kecepatan angin (V), maka energi per satuan waktu atau daya, dapat ditulis sebagai berikut:

$$P = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^2 \quad (2.3)$$

Untuk menganalisis seberapa besar energi angin yang dapat diserap oleh turbin angin, digunakan teori momentum elementer betz [17].

2.2.5. Teori momentum Elementer Betz

Teori momentum Elementer Betz dapat digunakan untuk menganalisis seberapa besar energi angin yang dapat diserap oleh turbin angin. Teori ini didasarkan ada pemodelan aliran dua dimensi dimana kecepatan aliran udara berkurang dan garis aliran membelok ketika melalui rotor. Berkurangnya kecepatan aliran udara disebabkan sebagian energi kinetik angin diserap oleh rotor turbin angin. Pada kenyataannya, putaran rotor menghasilkan perubahan kecepatan angin pada arah tangensial yang akibatnya mengurangi jumlah total energi yang dapat diambil dari angin. Profil kecepatan angin dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Kondisi Aliran Ekstraksi Energi Mekanik dari Aliran Udara Bebas [22].

Jika v_1 = kecepatan angin di depan rotor, v_2 = kecepatan angin di belakang rotor dan v' = kecepatan angin pada saat melalui rotor maka berdasarkan persamaan kontinuitas diperoleh:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (2.4)$$

Mempertimbangkan luas penampang tertentu (A) dimana udara melewati dengan kecepatan (v) dan volume yang mengalir selama satuan waktu tertentu (\dot{V}), aliran volume yang dimaksud adalah

$$\dot{V} = vA \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (2.5)$$

dan laju aliran massa dengan massa jenis udara ρ adalah

$$\dot{m} = \rho v A \text{ (kg/s)} \quad (2.6)$$

Energi kinetik dari udara yang bergerak dan aliran massa menghasilkan jumlah energi yang melalui penampang A per satuan waktu. Energi ini identik dengan power (P).

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \text{ (W)} \quad (2.7)$$

Kita ketahui bahwa energi mekanik hanya dapat dihasilkan dari besarnya energi kinetik yang terkandung dalam aliran angin. Ini berarti jika aliran massa tidak berubah, kecepatan aliran dibelakang turbin (*converter*) harus menurun. Pada saat yang sama terjadi pelebaran luas penampang saat aliran angin melewati turbin. Dengan demikian perlu mempertimbangkan kondisi di depan dan di belakang turbin seperti Gambar 2.5.

Energi mekanik yang berbentuk lempengan cakram mengekstrak dari aliran udara sesuai dengan perbedaan kekuatan aliran udara sebelum dan sesudah turbin (konverter). Energi mekanik yang diambil dari angin setiap satuan waktu didasarkan pada perubahan kecepatannya dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$P = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1^3 - \frac{1}{2} \rho A_2 v_2^3 = \frac{1}{2} \rho (A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3) \text{ (W)} \quad (2.8)$$

dimana:

P = daya yang diekstraksi (watt)

ρ = massa jenis udara (kg/m³)

A₁ = luas penampang aliran udara sebelum melalui rotor (m²)

A₂ = luas penampang aliran udara setelah melalui rotor (m²)

v₁ = kecepatan aliran udara sebelum melewati rotor (m/s)

v₂ = kecepatan aliran udara setelah melewati rotor (m/s)

Dengan menstubsitusi persamaan (2.6) dan (2.7) ke persamaan (2.8) menjadi,

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.9)$$

Dari persamaan tersebut dapat disimpulkan bahwa daya terbesar yang diambil dari angin adalah jika v₂ bernilai nol, yaitu angin berhenti setelah melalui rotor. Namun hal ini tidak dapat terjadi karena tidak memenuhi hukum kontinuitas.

Energi angin yang diubah akan semakin besar jika v_2 semakin kecil, atau dengan kata lain rasio v_1/v_2 harus semakin besar.

Persamaan lainnya yang diperlukan untuk mencari besarnya daya yang dapat diambil adalah persamaan momentum

$$F = \dot{m}(v_1 - v_2) \quad (2.10)$$

Dimana:

F = gaya (N)

\dot{m} = laju aliran massa udara (kg/s).

Sesuai dengan hukum ke-2 Newton, maka gaya yang diberikan udara kepada rotor sama dengan gaya hambat oleh rotor yang menekan udara ke arah yang berlawanan dengan arah gerak udara. Daya yang diperlukan untuk menghambat aliran udara:

$$P = Fv' = \dot{m}(v_1 - v_2)v' \quad (2.11)$$

Dimana, v' = kecepatan aliran udara pada rotor (m/s)

Kedua persamaan diatas digabungkan menunjukkan hubungan:

$$\frac{1}{2} \dot{m}(v_1^2 - v_2^2) = \dot{m}(v_1 - v_2)v'$$

Sehingga kecepatan aliran udara ketika melalui rotor:

$$v' = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) \quad (2.12)$$

Laju aliran massa menjadi:

$$\dot{m} = \rho A v' = \frac{1}{2} \rho A (v_1 + v_2) \quad (2.13)$$

Keluaran daya dari rotor dinyatakan dengan

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \quad (2.14)$$

Sedangkan daya yang melewati penampang rotor adalah

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \quad (2.15)$$

Perbandingan antara daya keluaran rotor terhadap daya total yang melalui penampang rotor disebut koefisien daya C_p dirumuskan:

$$C_p = \frac{P}{P_w} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)}{\frac{1}{2} \rho A v_1^3} \quad (2.16)$$

Dimana:

C_p = Koefisien daya (power coefficient)

P = Daya mekanik yang dihasilkan rotor (watt)

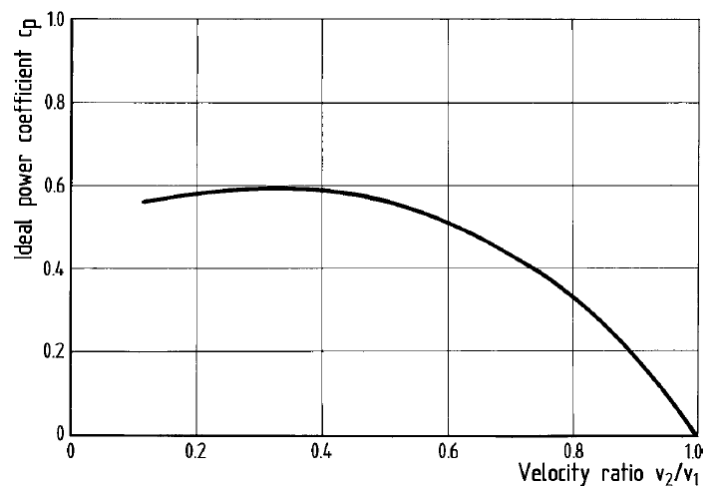
P_w = Daya mekanik total yang terkandung dalam angin yang melalui penampang (watt)

Persamaan diatas disederhanakan menjadi

$$C_p = \frac{P}{P_w} = \frac{1}{2} \left| 1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right| \left| 1 + \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \right| \quad (2.17)$$

C_p maksimum diperoleh apabila $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$ yang menghasilkan nilai sebesar 0,593 ini disebut dengan *Betz's limit*. Ini berarti, meski dengan asumsi ideal, dimana aliran dianggap tanpa gesekan dan daya keluaran dihitung dengan tanpa mempertimbangkan jenis turbin yang digunakan, daya maksimum yang bisa diperoleh dari energi angin adalah 0,593 yang artinya hanya sekitar 60% saja daya angin yang dapat dikonversi menjadi daya mekanik. Angka ini kemudian disebut faktor Betz. Faktor Betz menunjukkan nilai maksimum semua alat konversi energi angin, tak ubahnya mesin Carnot untuk mesin-mesin termodinamika [23].

Gambar 2.6 berikut ini merupakan nilai koefisien daya terhadap rasio kecepatan aliran udara v_2/v_1 .



Gambar 2.6. Koefisien Daya Terhadap Rasio Kecepatan Aliran Udara [20].

2.2.6. Tip Speed Ratio

Tip Speed Ratio (rasio kecepatan ujung) adalah rasio kecepatan ujung rotor terhadap kecepatan angin bebas. Untuk kecepatan angin nominal yang tertentu, *Tip Speed Ratio* akan berpengaruh pada kecepatan putar rotor. Turbin angin dapat bekerja secara maksimal pada *Tip Speed Ratio* tertentu, dengan kata lain turbin memiliki C_p yang optimal pada C_p tertentu.

Laju aliran udara memiliki kecepatan v yang dapat memutar rotor dalam satuan putaran per menit (N). Sehingga *tip speed ratio* dapat dihitung dengan perbandingan antara kecepatan keliling rotor dan kecepatan angin.

$$\lambda = \frac{\text{kecepatan keliling}}{\text{kecepatan angin}} = \frac{\pi DN}{60v} \quad (2.18)$$

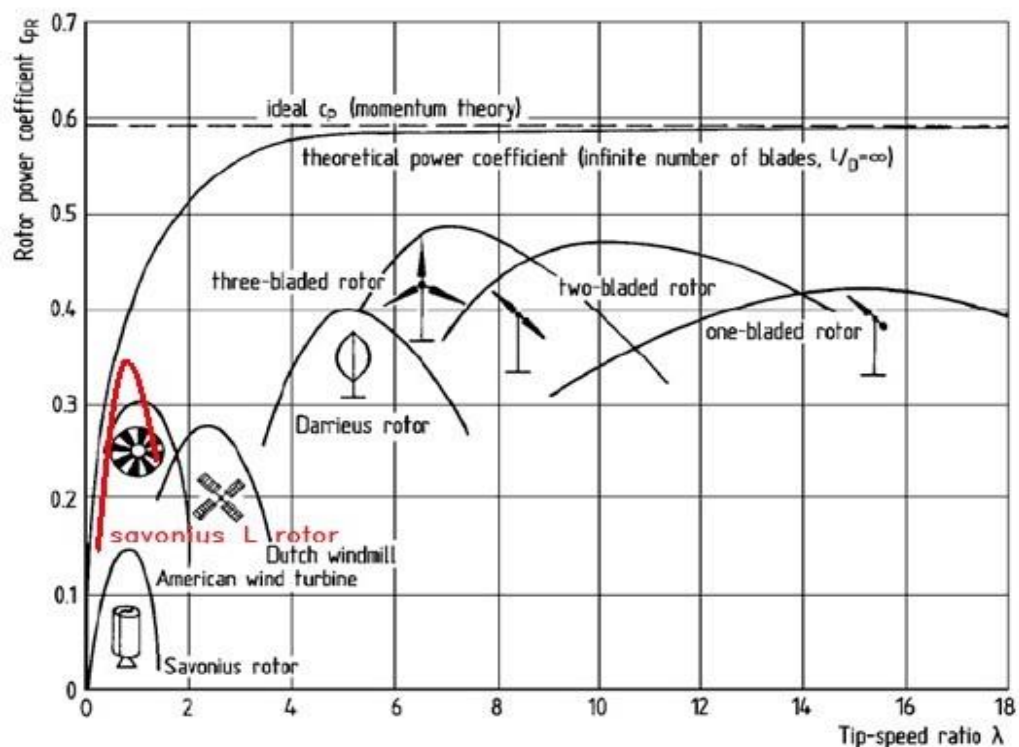
Dimana, λ = *tip speed ratio*

D = diameter rotor (m)

N = putaran rotor (rpm)

v = kecepatan angin (m/s)

Gambar 2.7 berikut ini menunjukkan variasi nilai *tip speed ratio* dan koefisien daya C_p untuk berbagai macam turbin angin.



Gambar 2.7. Nilai C_p dan *Tip Speed Ratio* untuk Berbagai Turbin Angin [20].

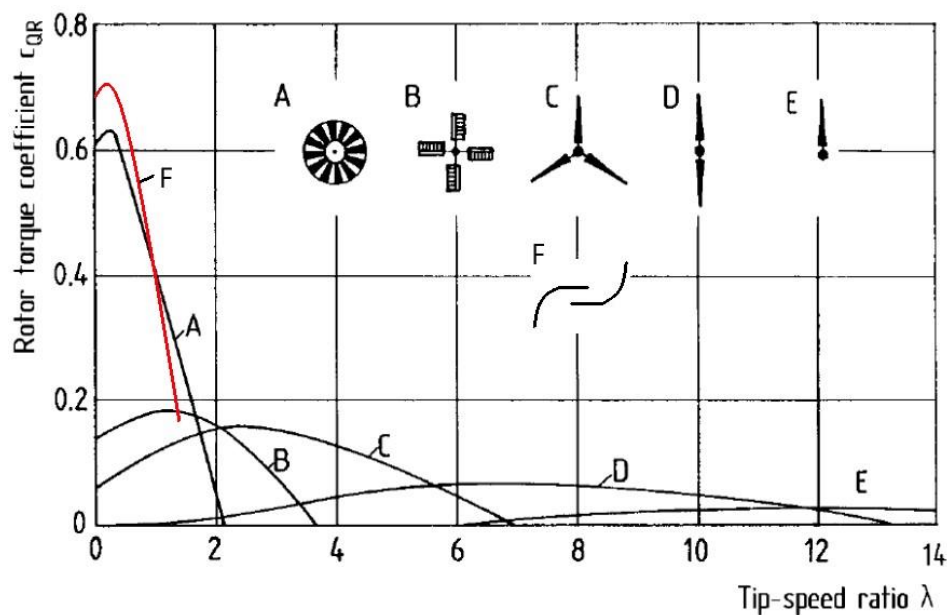
Koefisien daya adalah hal penting dalam merancang turbin angin karena menunjukkan berapa besar energi angin yang dapat dikonversi dari energi kinetik angin yang melalui penampang rotor. Koefisien daya sangat mempengaruhi kinerja turbin angin dan dipengaruhi oleh konstruksi turbin angin serta prinsip konversi energinya.

2.2.7. Koefisien daya dan koefisien torsi

Koefisien daya (C_p) dan koefisien torsi (C_m) seringkali digunakan sebagai acuan nilai performa dari turbin angin. Koefisien daya merupakan presentase besarnya energi angin yang dapat dikonversi menjadi energi mekanik [24]. Nilai C_p dan C_m dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$C_m = \frac{M}{0,25 \rho v^2 D_1 S} \quad (2.19)$$

Gambar 2.8. berikut ini menunjukkan variasi nilai *tip speed ratio* dan koefisien torsi C_m untuk berbagai macam turbin angin.



Gambar 2.8. Nilai C_m dan *Tip Speed Ratio* untuk Berbagai Turbin Angin [20].

$$C_p = \frac{P}{0,5 \rho v^3 S} \quad (2.20)$$

Nilai koefisien daya (C_p) dan koefisien torsi (C_m) memiliki hubungan linear. Hubungan antara koefisien torsi (C_m) dan koefisien daya (C_p) adalah sebagai berikut:

$$C_p = C_m \lambda \quad (2.21)$$

Dimana:

- λ = Tip speed ratio
- M = Torsi (Nm)
- ρ = Massa jenis udara (kg/m^3)
- v = Kecepatan udara (m/s)
- D_1 = Diameter luar turbin (m)
- S = Luas sapuan rotor (m^2)
- C_p = Koefisien daya
- P = Daya yang dihasilkan turbin (watt)

2.2.8. *Computational Fluid Dynamics* (CFD)

Computational Fluid Dynamics merupakan suatu program yang dapat digunakan untuk menganalisa aliran fluida beserta karakteristik yang ditimbulkan akibat Bergeraknya suatu benda pada fluida tersebut. Persamaan dasar yang digunakan pada CFD merupakan persamaan yang didasarkan pada dinamika fluida yaitu persamaan kontinuitas, momentum dan energi [25]. Prinsipnya adalah suatu ruang berisi fluida yang akan dilakukan perhitungan dibagi menjadi beberapa bagian. Bagian-bagian ini sering disebut dengan sel dan prosesnya dinamakan *meshing*. Sel merupakan sebuah kontrol perhitungan yang akan dilakukan oleh aplikasi. Pada setiap sel akan dilakukan perhitungan dengan batasan *domain* dan *boundary condition* yang telah ditentukan. Prinsip inilah yang dipakai pada proses perhitungan dengan menggunakan bantuan komputasi komputer. Secara umum proses perhitungan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) terdiri atas 3 bagian utama yaitu:

1. *Pre-processing*

Pre-processing adalah langkah awal dalam menganalisa sebuah model CFD. Sebelum sebuah model dianalisa, geometri model harus di definisikan terlebih dahulu menjadi *domain* komputasi. Kemudian membuat *meshing* yang

sesuai dengan geometri dan analisa yang akan dilakukan. Terakhir mendefinisikan kondisi batas dan sifat dari fluida yang akan digunakan.

2. *Solving*

Solving CFD merupakan proses pengolahan dan perhitungan dari kondisi yang telah di tetapkan saat *pre-processing*. Pada tahapan ini dilakukan proses komputasi numerik dengan menggunakan metode numerik berupa pendekatan variabel yang diketahui menjadi fungsi yang lebih sederhana, diskritisasi dengan substitusi pendekatan kedalam persamaan yang mengatur aliran, serta solusi dari persamaan aljabar.

3. *Post-processing*

Post-processing merupakan tahap akhir dalam analisis CFD. Tahap ini, hasil dari komputasi numerik yang telah dilakukan dibuat visualisasikan dan di dokumentasikan dalam bentuk gambar, kurva, dan animasi. Hasil visualisasi dan dokumentasi akan dibuat untuk melakukan analisa.

2.2.9. *Meshing*

Proses *meshing* bertujuan untuk membagi *solution domain* menjadi bagian bagian yang lebih kecil lagi yang disebut dengan *cell*. Keakuratan dan perhitungan tergantung dari dan ukuran serta struktur *cell*. Proses perhitungan yaitu melalui iterasi diantara *cell-cell* dalam *mesh*. Jumlah pembagian mesh ini nantinya akan menentukan keakuratan dari hasil komputasi numerik yang dilakukan. Semakin halus hasil *meshing* maka hasil komputasi numerik akan semakin akurat, namun waktu proses komputasi numerik akan menjadi lebih lama. *Software Ansys* akan menyeimbangkan gaya dan aliran-aliran massa pada setiap *cell* hingga *error* dapat diprediksi dan diperkecil. Kualitas *meshing* dapat diukur menggunakan *mesh metric*. Skala kualitas *meshing* untuk *mesh metric skewness* ditunjukkan pada Tabel 2.2. [26]

Tabel 2.2. Skala Kualitas *Meshing*.

<i>Value of skewness</i>	0-0,25	0,25-0,5	0,5-0,8	0,8-0,95	0,95-0,98	0,98-1,00
<i>Quality</i>	<i>Excellent</i>	<i>Very good</i>	<i>good</i>	<i>acceptable</i>	<i>bad</i>	<i>Unacceptable</i>

2.2.10. Persamaan dasar CFD

Pada dasarnya CFD merupakan pendekatan dari karakteristik fluida dengan kondisi *real*. CFD menggunakan persamaan dasar dinamika fluida yaitu persamaan kekekalan massa dan momentum. Berikut persamaan dasar yang digunakan dalam simulasi turbin *savonius*: [8]

1. *Continuity*

Sistem merupakan beberapa massa yang tetap atau tidak berubah. Secara sederhana, prinsip dari hukum kekekalan massa adalah laju perubahan massa sistem terhadap waktu sama dengan nol. Massa sistem konstan pada saat sistem bergerak melalui medan aliran. Berdasarkan pada hukum konservasi massa muncul persamaan kontinuitas untuk 2 dimensi sebagai berikut:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0 \quad (2.22)$$

Karena fluida bersifat *incompressible*, maka massa jenis dianggap konstan. Sehingga persamaan diubah menjadi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.23)$$

Dimana:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \text{perubahan massa jenis terhadap waktu per satuan luas (kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{)}$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} = \text{laju perubahan flux massa per satuan luas pada sumbu x (kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{)}$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial y} = \text{laju perubahan flux massa per satuan luas pada sumbu y (kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{)}$$

2. Persamaan momentum

Hukum Newton Kedua menyebutkan bahwa gerakan pada sistem merupakan laju perubahan momentum linear pada sistem sama dengan jumlah seluruh gaya luar yang bekerja pada sistem. Gaya yang bekerja pada suatu sistem dapat dibagi menjadi 2, yakni *surface force* dan *body force*. Pada keadaan normal, gaya yang bekerja pada partikel udara adalah *Surface force*. *Surface force* dapat dicontohkan seperti gaya gravitasi, gaya tekan, dan gaya viskous. *Surface force* biasanya berkaitan dengan tekanan (P) dan komponen

tengangan (τ). Sedangkan untuk *body force* contohnya yaitu gaya sentrifugal dan gaya elektromagnet.

Incompressible Navier-Stoke Equation merupakan persamaan momentum yang digunakan dalam sistem CFD. Dalam simulasi turbin angin *savonius*, kecepatan udara yang melewati turbin angin cenderung rendah. Sehingga fluida dapat diasumsikan sebagai fluida *incompressible*. Persamaan *Navier-Stoke* untuk fluida *incompressible* dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)\end{aligned}\quad (2.24)$$

3. Turbulensi

Turbulensi merupakan fenomena aliran fluida yang sering ditemukan dalam berbagai aplikasi industri. Aliran turbulensi sering ditemukan pada penukar kalor, reaktor kimia, kecepatan angin yang melewati turbin angin, dsb. Dalam CFD salah terdapat beberapa jenis model turbulensi. Kelebihan dan kelemahan model turbulensi CFD dapat dilihat pada Tabel 2.3. [27]

Tabel 2.3. Kelebihan dan Kelemahan Model Turbulensi CFD [27].

Model turbulensi	Kelebihan	Kelemahan
<i>Realizable k-ε model</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Lebih akurat untuk memprediksi laju penyebaran fluida • bagus untuk aliran yang melibatkan putaran, lapisan batas gradien tekanan yang besar, separasi, dan resirkulasi 	Terbentuknya viskositas turbulen non-fisik pada kasus dimana domain perhitungan mengandung zona fluida yang diam dan berputar (<i>multiple reference frame, sliding mesh</i>)

Model turbulensi	Kelebihan	Kelemahan
<i>k-ω model</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak membutuhkan fungsi dinding • Berfungsi baik pada aliran terpisah 	Butuh <i>mesh</i> yang baik pada daerah dekat dinding.
<i>Shear Stress Transport (SST) model</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Menggunakan <i>k-ϵ model</i> pada aliran bebas dan <i>k-ω</i> pada daerah dekat dinding • Berfungsi sangat baik pada tekanan terpisah • Banyak disarankan untuk menggantikan <i>k-ϵ model</i> 	Butuh <i>mesh</i> yang baik pada daerah yang dekat dengan dinding

Pada simulasi ini yang digunakan adalah model turbulensi yaitu *realizable k- ϵ model*. Model turbulensi *realizable k- ϵ* lebih baik dibandingkan dengan *standard k- ϵ* untuk perhitungan simulasi di dekat permukaan dinding. Turbulensi *realizable k- ϵ* menggunakan dua variabel, yaitu *turbulent kinetic energy* (k) dan *rate of dissipation of kinetic energy* (ϵ). Persamaan *realizable k- ϵ model*:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_m + S_k \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_1 \epsilon \frac{\epsilon}{k} C_3 \epsilon G_b + S_\epsilon \quad (2.26)$$

$$C_1 \epsilon \frac{\epsilon}{k} C_3 \epsilon G_b + S_\epsilon$$

Dimana,

u_i = kecepatan komponen

$$G_k = \text{turbulent kinetic energy akibat gradien kecepatan rata-rata} = \mu_t S^2$$

$$S = \text{modulus of the mean rate of strain tensor}$$

$$\mu_t = \text{edddy viscosity}$$

$$Gb = \text{generation of turbulent kinetic energy karena efek buoyancy}$$

$$Y_m = \text{contribution of the fluctuating dilatation incompressible}$$

$$\text{turbulence to the overall dissipation rate} = 2\rho\varepsilon \frac{k}{\gamma RT}$$

$$\sigma_k \text{ dan } \sigma_\varepsilon = \text{turbulent Prandtl numbers for } k \text{ and } \varepsilon$$

$$S_k \text{ dan } S_\varepsilon = \text{user defined source terms.}$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$$

Nilai konstan:

$$C_{1\varepsilon} = 1,44$$

$$C_2 = 1,9$$

$$\sigma_k = 1,0$$

$$\sigma_\varepsilon = 1,2$$

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Komputasi dan Perancangan Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta.

3.2. Alat dan Instrumentasi Penelitian

Peralatan yang digunakan pada simulasi dan pengambilan data penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Laptop/PC

Untuk menjalankan proses simulai dan pengambilan data dengan baik dibutuhkan laptop/PC dengan spesifikasi yang cukup memadai. Spesifikasi laptop yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Spesifikasi Laptop yang digunakan.

Seri Laptop	ACER ASPIRE E 14
Prosesor	Intel Core i7-7500U
RAM	12,00 GB
Sistem	64-bit <i>Operating System</i> , x64-based processor

2. *Solidwork* 2017

Solidwork 2017 digunakan untuk mengGambar geometri dari turbin angin tipe *savonius* L yang akan disimulasikan.

3. Software ANSYS 19.0 Fluent

Software ANSYS 19.0 digunakan untuk melakukan analisa terhadap fluida yang melewati turbin angin tipe *savonius*. Sehingga akan didapatkan output berupa *pressure*, *force*, sebaran kecepatan fluida, *moment* yang dihasilkan, serta parameter lain yang digunakan untuk mengetahui performa dari turbin angin tipe *savonius* yang disimulasikan.

3.3. Parameter Penelitian

Pada penelitian ini, akan dianalisis performa dari turbin angin *savonius* L yang dimodifikasi dengan penambahan sirip vertikal. Simulasi dilakukan dengan pemodelan 2 dimensi transien dengan aliran fluida turbulen yang memiliki

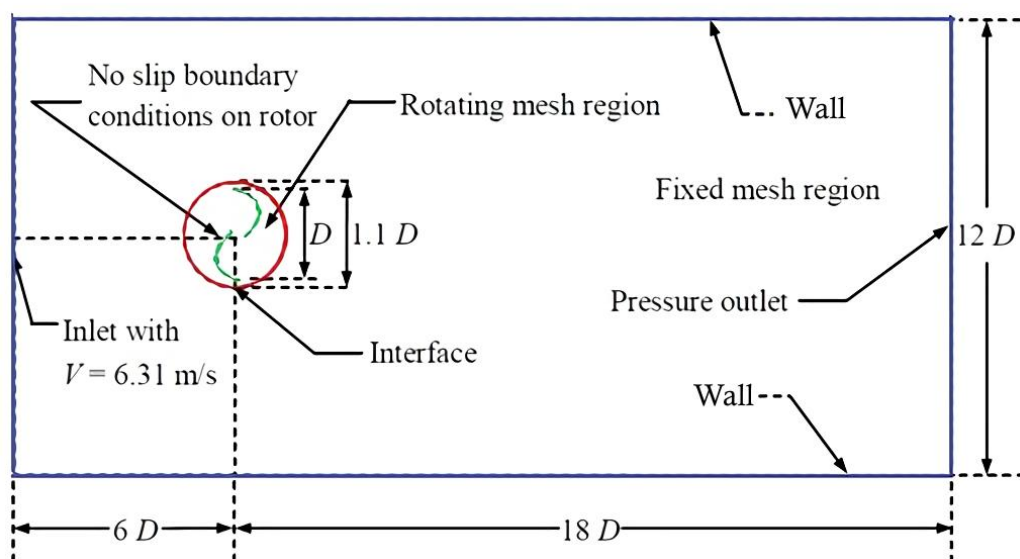
kecepatan masuk konstan 6,31 m/s. *Tip Speed Ratio* yang digunakan adalah 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; dan 1,2. Sedangkan sirip vertikal divariasiakan dengan tanpa sirip, 1 sirip, dan 2 sirip. Parameter dari turbin angin tipe *savonius* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2. Parameter yang Digunakan dalam Simulasi Turbin Angin *Savonius* [5].

Diameter	1000 mm
<i>Arc radius</i> ($S_1=S_2$)	42% of the chord length
<i>Overlap distance</i> (e)	40% of the chord length
Tebal sudu (t)	4 mm
<i>Blade gap</i> (a)	10% of the chord length
<i>Blade arc angle</i>	135°

3.4. Domain Komputasi

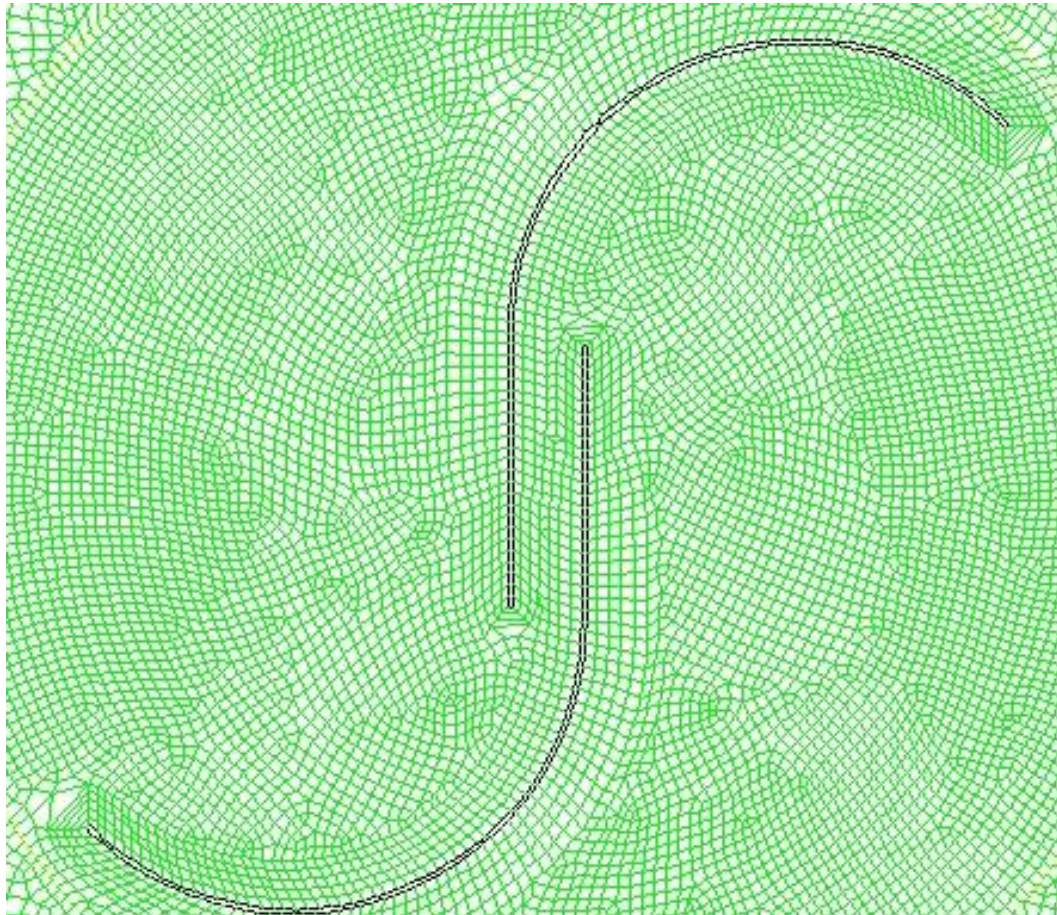
Domain komputasi pada pemodelan ini menggunakan bentuk persegi panjang, dengan ukuran panjang 24D dan lebar 12D. Turbin *savonius* diletakkan pada garis simetrisnya dengan jarak dari sisi depan sebesar 6D. *Domain* dibagi menjadi dua sub yaitu *fixed domain* dan *rotating domain*. Persegi panjang di bagian luar dijadikan *fixed domain*, sedangkan turbin *savonius* di dalamnya dijadikan *rotating domain*. Domain komputasi pada pemodelan ini ditunjukkan pada Gambar 3.1 dan pemodelan dilakukan dengan metode *sliding mesh*.



Gambar 3.1. Domain Pemodelan Turbin Angin *Savonius*.

3.5. Meshing

Domain mesh turbin *savonius* yang digunakan adalah menggunakan *mesh* segi empat (*rectangural mesh*). Lapis batas pada permukaan sudu digunakan untuk menangkap perubahan tajam sifat fluida dekat permukaan sudu. Sehingga, hasil yang didapatkan akan lebih akurat seperti yang dapat dilihat di Gambar 3.2.

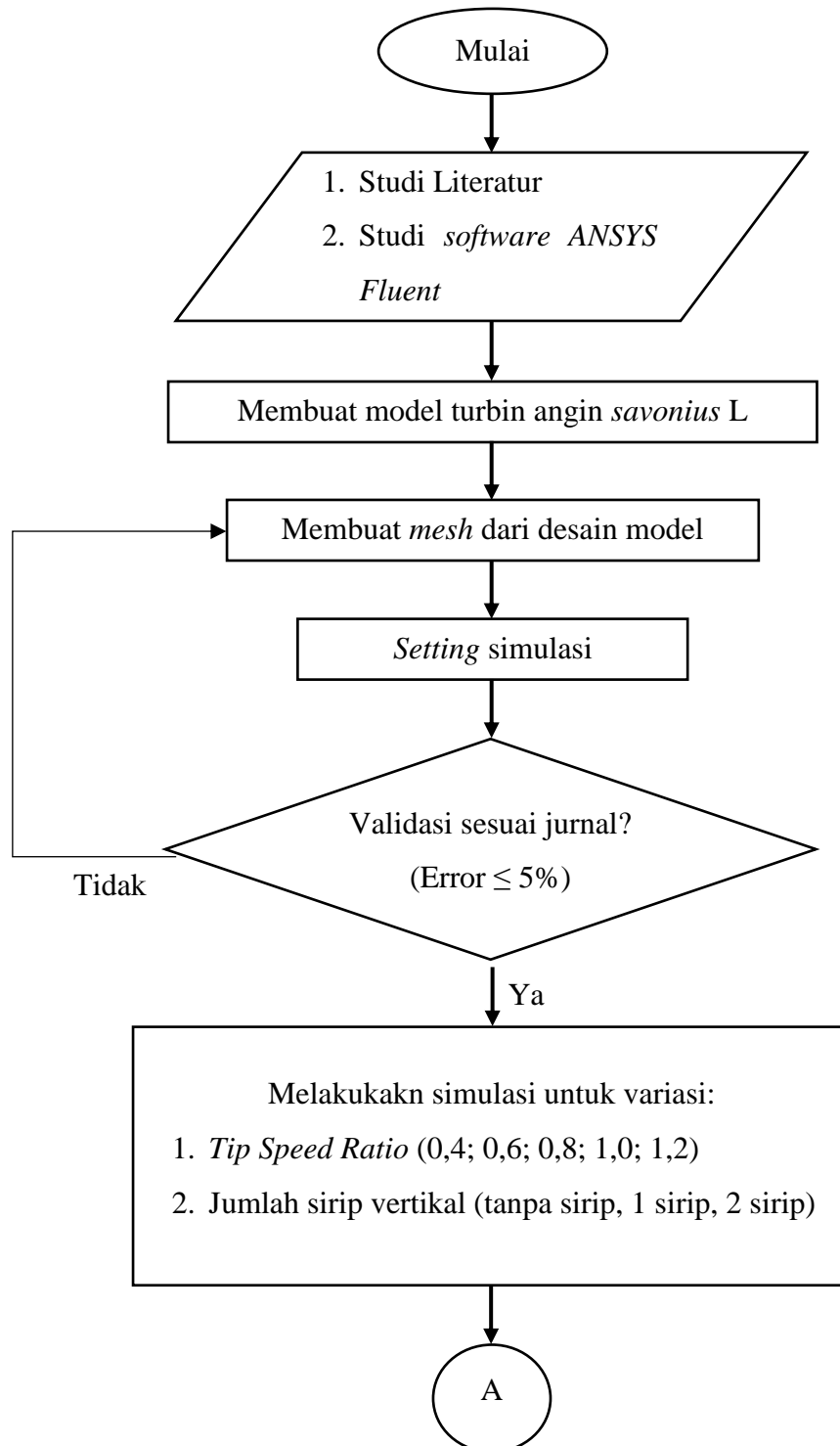


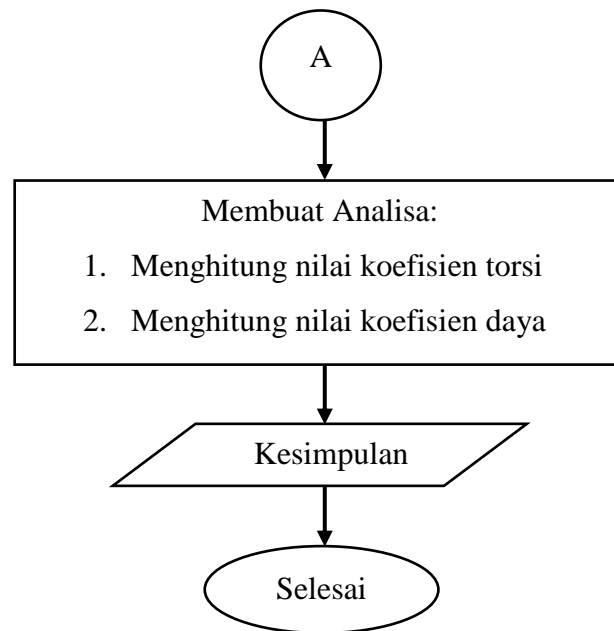
Gambar 3.2. Meshing pada Sudu Turbin Savonius.

3.6. Kondisi Batas

Pada batas *inlet domain* komputasi digunakan kecepatan udara konstan sebesar 6,31 m/s. Batas *outlet* diasumsikan *relative static pressure* 0 Pa. Aliran udara diasumsikan memiliki bentuk dua dimensi simetri di bagian sisi atas dan di sisi bawah *domain* komputasi. Sudu dibuat *boundary wall*, dengan asumsi *no slip wall*.

3.7. Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.3. Diagram Alir Penelitian.

3.8. Prosedur Penelitian

1. Mempelajari literatur dan *software*

Literatur mengenai turbin *savonius* dan pemodelannya menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Mempelajari pemodelan CFD menggunakan ANSYS *Fluent* 19.0 seperti membuat geometri, *meshing*, dan *set up* yang paling tepat.

2. Membuat model turbin angin *savonius*

Membuat model turbin angin tipe *savonius* menggunakan aplikasi desain seperti *Solidwork* 2017. Turbin angin *savonius* dibuat dalam bentuk pemodelan 2D yang kemudian akan diimport kedalam *software* ANSYS.

3. Meshing

Proses *meshing* bertujuan untuk membuat *solution domain* menjadi beberapa bagian. Jumlah pembagian tersebut akan menentukan keakuratan hasil dari simulasi. Semakin besar jumlah pembagian tersebut proses komputasi akan semakin lama. Sehingga diperlukan *meshing* yang tepat agar hasil yang diperoleh baik dengan waktu yang tidak terlalu lama.

4. Pengaturan simulasi

Memasukan data data yang diperlukan ke dalam inputan simulasi, seperti pengaturan dalam pemodelan turbulensi aliran, sifat dari fluida, kondisi batas dan waktu iterasi yang diperlukan.

5. Validasi jurnal

Membandingkan hasil simulasi dengan hasil simulasi pada jurnal acuan. Hasil yang dibandingkan berupa nilai koefisien torsi. Jika hasil dari simulasi telah sesuai dengan jurnal acuan, maka hasil simulasi dianggap telah valid dan dapat digunakan untuk variasi pada turbin angin *savonius* L. Namun jika hasil simulasi belum sesuai dengan jurnal acuan, maka diperlukan perbaikan *meshing* atau pengaturan ulang simulasi.

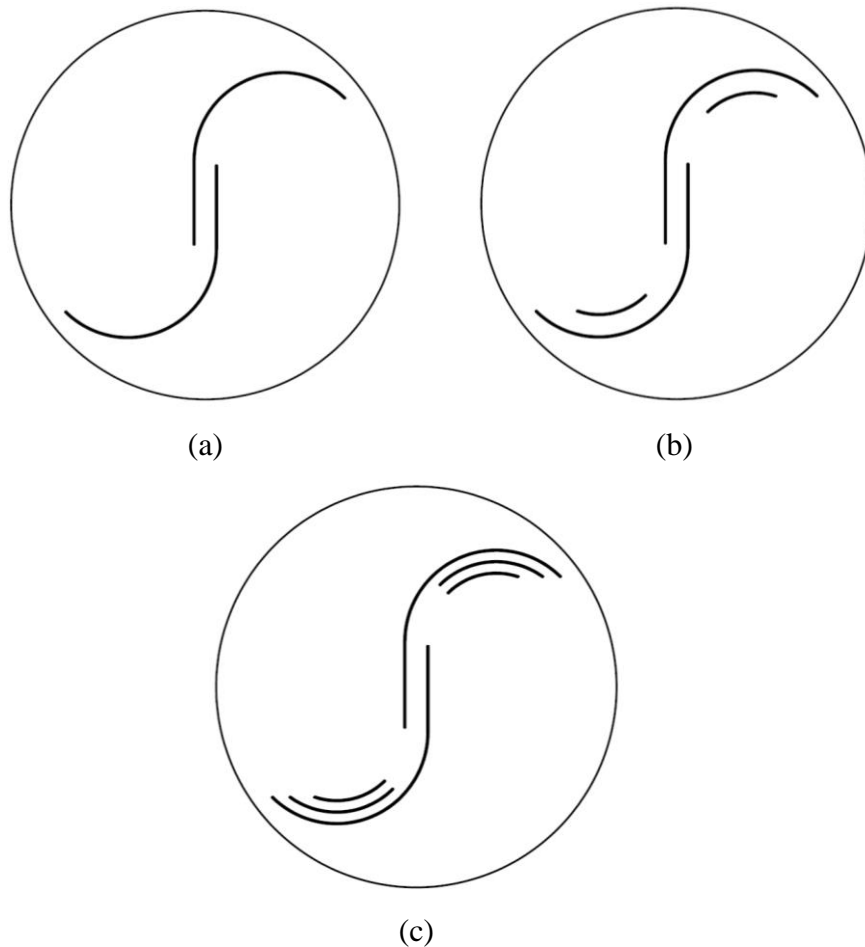
6. Variasi

a. *Tip Speed Ratio*

Tip Speed Ratio yang digunakan adalah 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; dan 1,2.

b. Sirip vertikal

Variasi yang digunakan adalah tanpa sirip vertikal, 1 sirip vertikal, dan 2 sirip vertikal.



Gambar 3.4. Variasi (a) Tanpa Sirip Vertikal (b) 1 Sirip Vertikal (c) 2 Sirip Vertikal.

7. Analisa data

Hasil dari simulasi yang berupa data koefisien torsi setiap *time steps* diolah dengan mencari nilai rata-rata koefisien torsi, kemudian dihitung koefisien daya dan menganalisa data hasil simulasi dengan berpatokan pada jurnal dan literatur terkait. Kemudian ditarik kesimpulan dari penelitian yang dilakukan.

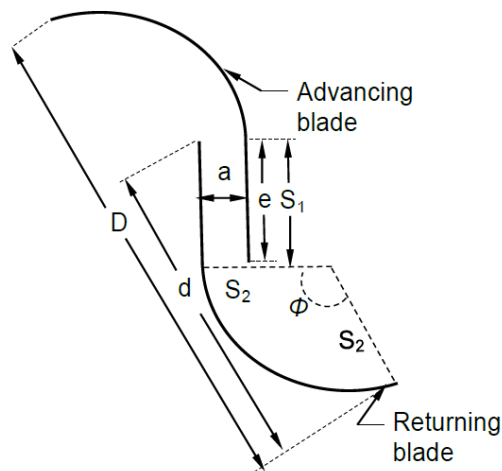
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Validasi Penelitian

Validasi penelitian merupakan salah satu tahap penelitian dengan simulasi yang harus dilalui agar hasil penelitian yang dihasilkan valid. Validasi turbin *savonius* L dilakukan untuk memastikan penulis mampu mengembangkan pemodelan turbin *savonius* L dengan penambahan sirip vertikal. Validasi pemodelan turbin *savonius* L ini ditinjau dari hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Sukanta Roy.

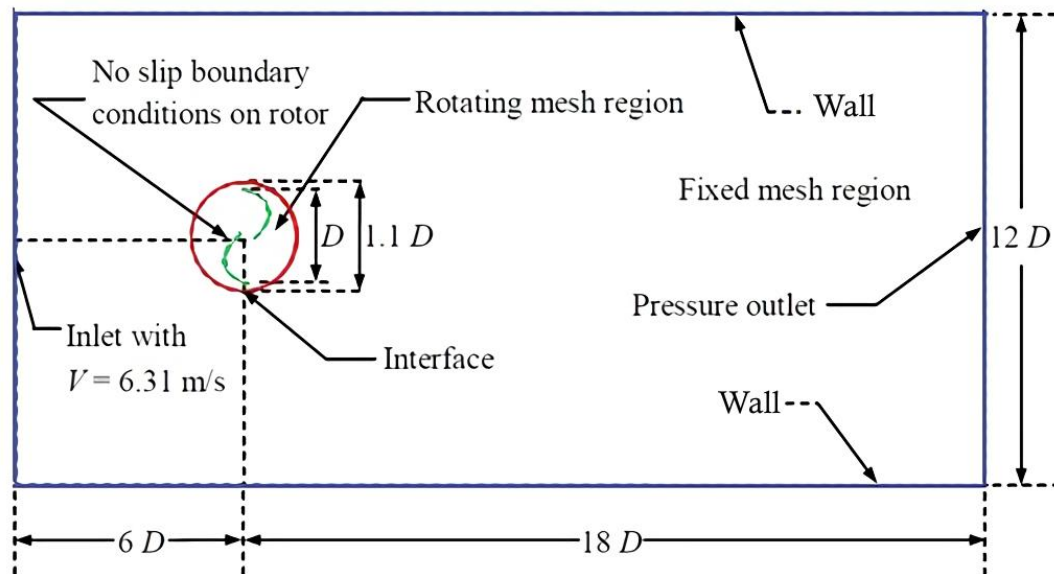
Proses validasi turbin angin *savonius* L menggunakan geometri berdiameter 1000 mm. Lalu tebal sudunya (t) 4 mm. memiliki *arc radius* ($S_1=S_2$) 42% dari panjang *chord length*, *Overlap distance* (e) memiliki panjang 40% of the *chord length*, *Blade gap* (a) 10% dari panjang *chord length*, serta *blade arc angle* 135° . Geometri turbin *savonius* L dapat ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Geometri Turbin Angin *Savonius* L.

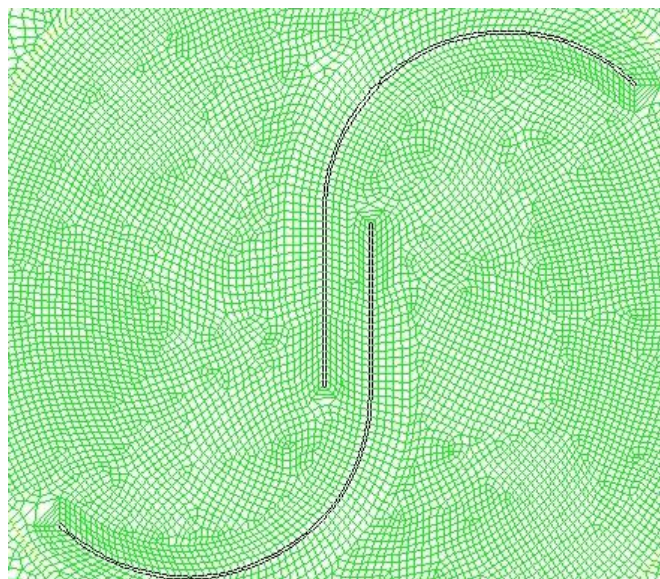
Domain pada validasi pemodelan ini menggunakan bentuk persegi panjang dengan panjang 24 m dan lebar 12 m. Turbin *savonius* L diletakkan pada garis simetri dengan jarak 6 m dari depan. Pada pemodelan turbin digunakan teknik *sliding mesh* untuk memodelkan putaran turbin dengan putaran sebesar 10,096 rad/s ($\lambda = 0.8$). *Domain* dibagi menjadi dua bagian yaitu *rotating domain* dan *fixed domain*. *Rotating domain* berisi turbin *savonius* L dan *fixed domain* yaitu bagian luarnya. Pada *rotating domain* diaplikasikan *mesh motion* untuk memodelkan

turbin dalam keadaan berputar. Pemodelan turbin angin *savonius* L ditunjukkan pada Gambar 4.2.



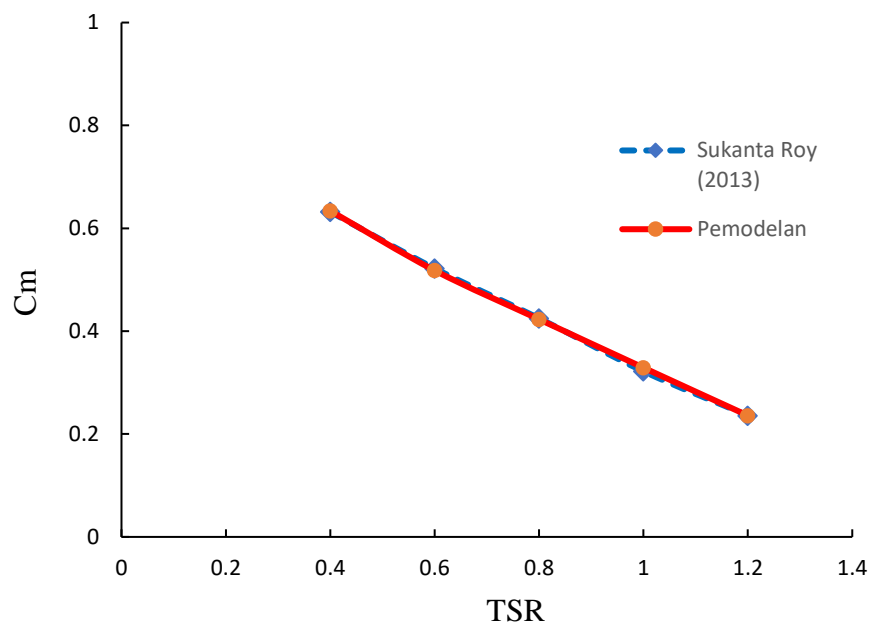
Gambar 4.2. Domain Pemodelan Turbin Angin Savonius L.

Meshing pada pemodelan *savonius* L menggunakan *meshing rectangular*, pada bagian bilah dan bagian tepi antara domain turbin dan domain luar menggunakan *edge sizing*. Proses *meshing* pada validasi turbin *savonius* L memberikan nilai *skewness* maksimal sebesar 0,76 artinya *meshing* sudah bagus [26]. Hasil *meshing* pada pemodelan *savonius* L oleh simulasi ANSYS ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Meshing Hasil Simulasi.

Model turbulensi yang digunakan adalah *realizable k-ε*. *Realizable k-ε* memiliki formulasi baru untuk menentukan nilai *turbulent viscosity* dan *transport equation* untuk menentukan nilai *dissipation rate*, sehingga akan memberikan hasil yang lebih konsisten untuk aliran yang menyertakan rotasi, separasi dan *recirculation* serta mempunyai akurasi pada *range* aliran turbulen yang lebar. Kondisi batas pada bagian *inlet* diasumsikan kecepatan udara masuk ke ruang tersebut secara konstan sebesar 6.31 m/s. *Boundary wall* pada bagian sudu diasumsikan *no slip wall*. Kondisi batas untuk bagian *outlet* diasumsikan *relative static pressure* 0 Pa. Hasil permodelan turbin angin *savonius* L berupa rata-rata nilai koefisien torsi (C_m) dan koefisien daya (C_p) yang dibandingkan dengan jurnal pada $\lambda = 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; \text{ dan } 1,2$ ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Grafik Nilai C_m (Koefisien Torsi) dari Sukanta Roy dan Hasil Pemodelan.

Besarnya nilai C_m dapat diketahui dengan menghitung rata-rata pada 3 detik terakhir. Berdasarkan pada Gambar 4.4 nilai C_m rata-rata yang didapatkan pada penelitian Sukanta Roy dengan nilai C_m rata-rata terdapat sedikit perbedaan. Dari perbedaan tersebut nilai *error* dapat dicari dengan cara:

$$Error = \frac{(C_m \text{ jurnal} - C_m \text{ penelitian})}{C_m \text{ jurnal}} \times 100\%$$

Nilai error dari hasil validasi antara jurnal dan hasil pemodelan dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Nilai *Error* Hasil Validasi Jurnal dan Hasil Pemodelan.

TSR	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
Error	0.32%	0.77%	0.47%	2.17%	0.0%

Dari hasil validasi antara jurnal dari Sukanta Roy dan hasil penelitian menggunakan *Ansys* didapatkan nilai *error* maksimal sebesar 2,17 % (kurang dari 5%) sehingga dapat dilakukan pengembangan pemodelan turbin angin *savonius* L dengan penambahan sirip vertikal menggunakan software *Ansys Fluent* 19.0.

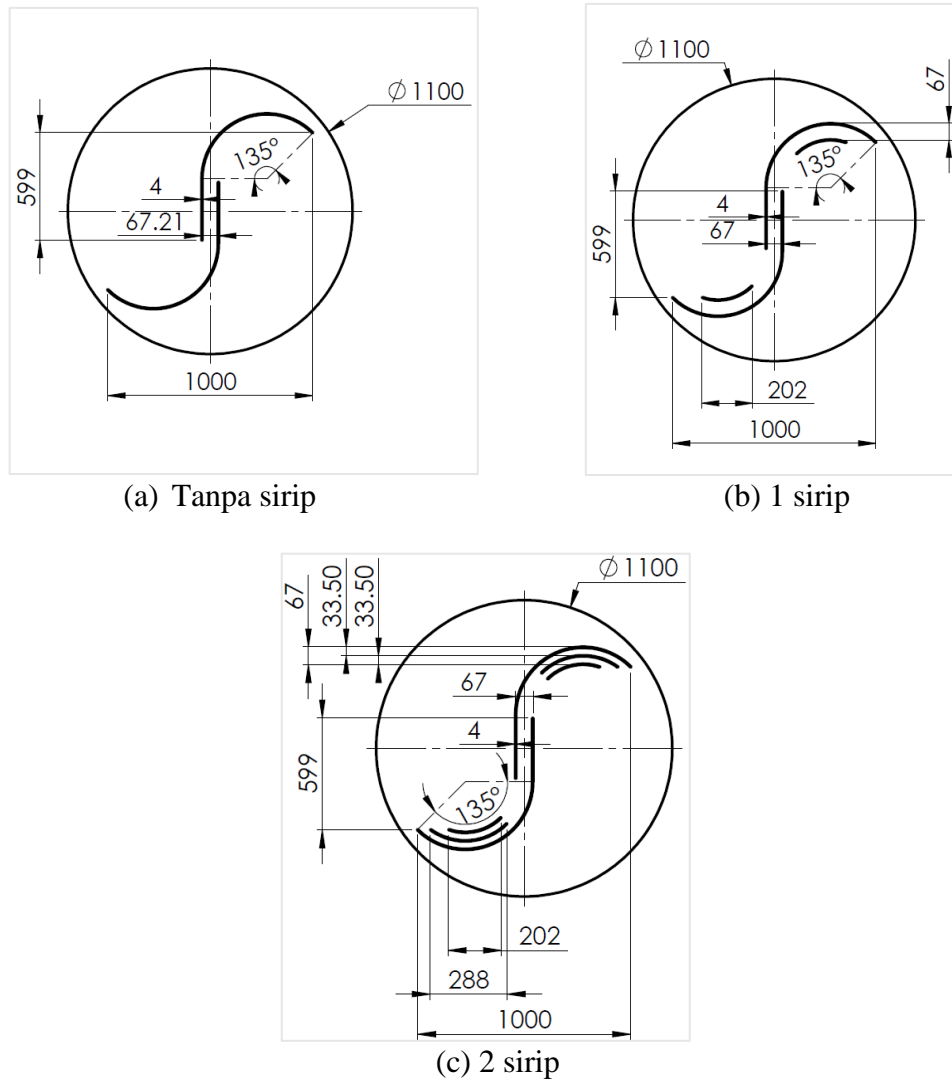
4.2. Pemodelan Turbin Angin *Savonius* L Dengan Variasi Sirip Vertikal

Pemodelan turbin angin *savonius* L dilakukan dengan cara memvariasikan tanpa sirip, penambahan 1 sirip vertikal dan penambahan 2 sirip vertikal. Setiap variasi diteliti pada TSR 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; dan 1,2 dengan kecepatan angin pada *inlet* sebesar 6.31 m/s, sehingga kecepatan sudut turbin angin berturut-turut adalah 5,048 rad/s; 7,572 rad/s; 10,096 rad/s; 12,620 rad/s; dan 15,144 rad/s. Geometri turbin yang digunakan pada simulasi ini ditunjukkan pada Tabel 4.1. di bawah ini.

Tabel 4.2. Geometri Turbin.

Properties	Nilai
Diameter	1000 mm
<i>Arc radius</i> ($S_1=S_2$)	42% of the chord length
<i>Overlap distance</i> (e)	40% of the chord length
Tebal sudu (t)	4 mm
<i>Blade gap</i> (a)	10% of the chord length
<i>Blade arc angle</i>	135°
Jarak antar sudu utama dengan sirip terluar	67 mm

Konfigurasi variasi tanpa sirip, penambahan 1 sirip vertikal dan penambahan 2 sirip vertikal yang digunakan pada simulasi ini ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Konfigurasi variasi (a) tanpa sirip vertikal (b) 1 sirip vertikal, dan (c) 2 sirip vertikal. (satuan dalam mm)

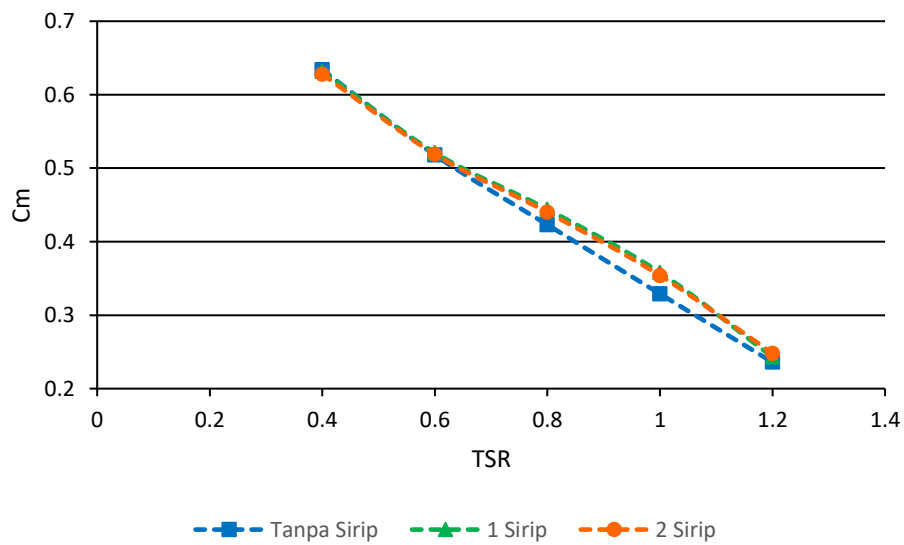
Tabel 4.3. Hasil Simulasi Turbin Angin *Savonius* L.

TSR	Tanpa Sirip		1 Sirip		2 Sirip	
	Cm rata-rata	Cp rata-rata	Cm rata-rata	Cp rata-rata	Cm rata-rata	Cp rata-rata
0,4	0,634	0,253	0,632	0,252	0,628	0,251
0,6	0,518	0,310	0,521	0,312	0,519	0,311
0,8	0,423	0,338	0,444	0,355	0,248	0,339
1,0	0,329	0,329	0,358	0,358	0,354	0,354
1,2	0,236	0,283	0,243	0,291	0,248	0,297

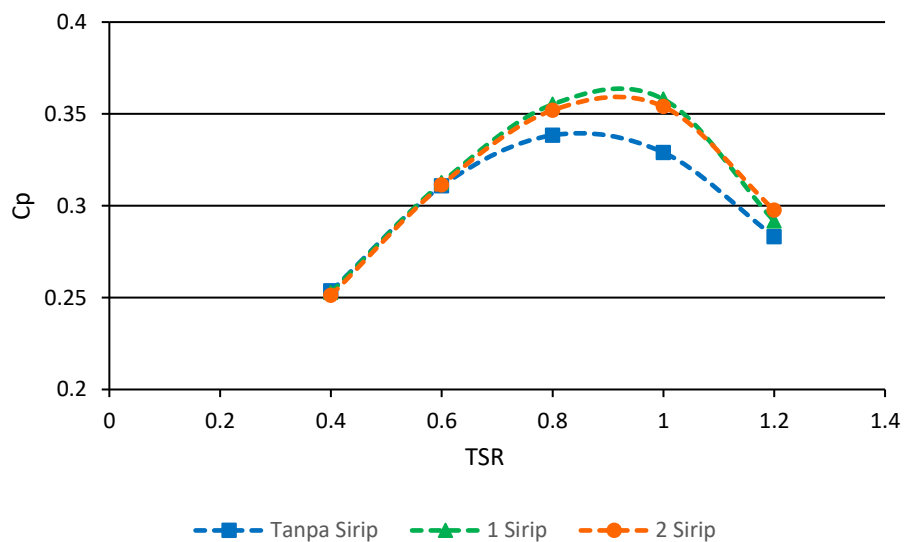
Tabel 4.3 menunjukkan nilai koefisien torsi setiap turbin angin *savonius* L variasi tanpa sirip vertikal, 1 sirip vertikal, dan 2 sirip vertikal. Pada turbin angin *savonius* L tanpa sirip vertikal, koefisien torsi tertinggi dicapai turbin pada TSR 0,4 yaitu sebesar 0,634. Unjuk kerja performa turbin angin dapat dilihat dengan nilai koefisien daya (C_p) yang dihasilkan oleh rata-rata turbin tersebut. Nilai C_p dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.22). Turbin tanpa penambahan sirip vertikal mencapai nilai koefisien daya rata-rata maksimum pada TSR 0,8 yaitu sebesar 0,338. Sedangkan, turbin pada TSR 0,4 memiliki nilai koefisien daya rata-rata yang paling rendah yaitu sebesar 0,253. Nilai koefisien daya rata-rata pada TSR 0,6; 1,0; dan 1,2 berturut-turut adalah 0,310; 0,329; dan 0,283.

Turbin angin *savonius* L dengan penambahan 1 sirip vertikal, koefisien torsi tertinggi dicapai turbin pada TSR 0,4 yaitu sebesar 0,632. Turbin dengan penambahan 1 sirip vertikal mencapai nilai koefisien daya rata-rata maksimum pada TSR 1,0 yaitu sebesar 0,358. Sedangkan, turbin pada TSR 0,4 memiliki nilai koefisien daya rata-rata yang paling rendah yaitu sebesar 0,252. Nilai koefisien daya rata-rata pada TSR 0,6; 0,8; dan 1,2 berturut-turut adalah 0,312; 0,355; dan 0,291. Besarnya nilai koefisien daya (C_p) pada Tabel dikonversi ke dalam grafik untuk melihat pengaruh penambahan 1 sirip vertikal turbin.

Turbin angin *savonius* L dengan penambahan 2 sirip vertikal, koefisien torsi tertinggi dicapai turbin pada TSR 0,4 yaitu sebesar 0,628. Turbin dengan penambahan 2 sirip vertikal mencapai nilai koefisien daya rata-rata maksimum pada TSR 1,0 yaitu sebesar 0,354. Sedangkan, turbin pada TSR 0,4 memiliki nilai koefisien daya rata-rata yang paling rendah yaitu sebesar 0,251. Nilai koefisien daya rata-rata pada TSR 0,6; 0,8; dan 1,2 berturut-turut adalah 0,311; 0,339; dan 0,297.



Gambar 4.6. Hubungan C_m dengan TSR pada Variasi Jumlah Sirip Vertikal.



Gambar 4.7. Hubungan C_p dengan TSR pada Variasi Jumlah Sirip Vertikal.

Gambar 4.6 menunjukkan hubungan antara koefisien torsi dengan *tip speed ratio*. Grafik tersebut menunjukkan nilai koefisien torsi yang cenderung menurun seiring dengan bertambahnya *tip speed ratio*. Besarnya nilai koefisien daya (C_p) pada Tabel 4.3-4.5 dikonversi ke dalam grafik untuk melihat pengaruh penambahan sirip vertikal terhadap nilai rata-rata C_p . Dari hasil simulasi didapatkan hasil nilai C_p turbin angin *savonius* L dengan penambahan 1 sirip vertikal memiliki peningkatan sebesar 8,81% pada TSR 1,0 dibandingkan dengan turbin angin *savonius* L tanpa penambahan sirip vertikal. Dari Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa

nilai C_p mengalami kenaikan dari TSR 0,4; 0,6; 0,8 dan mencapai puncaknya pada TSR 1. Namun setelah TSR 1 kemudian cenderung mengalami penurunan, yaitu pada TSR 1,2. Hal ini membuktikan bahwa turbin angin *savonius* L dengan penambahan sirip vertikal dapat berkerja secara optimal pada TSR 1.

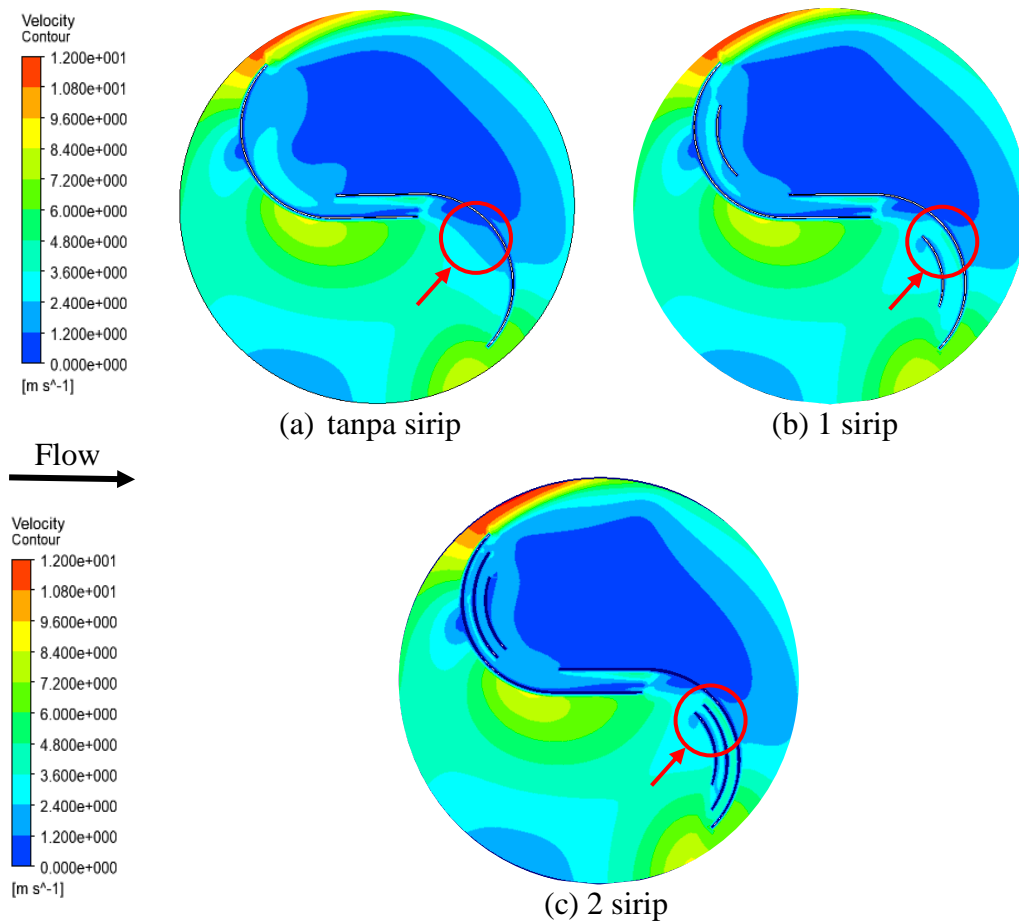
Merujuk pada hasil simulasi penelitian yang dilakukan oleh Sonu Sarma [6]. Sonu Sharma membandingkan turbin angin *savonius* konvensional (sudu setengah lingkaran) dengan turbin angin yang sudah dimodifikasi (*multiple quarter blades*). Hasil yang diperoleh dari penelitian Sonu adalah turbin angin *savonius* konvensional memiliki C_p 0,208 sedangkan turbin angin *savonius* dengan *multiple quarter blades* memiliki C_p 0,226. Hal tersebut menunjukkan bahwa terjadi peningkatan kinerja dari turbin angin sebesar 8,89% pada kecepatan 8,23 m/s. Sehingga, dari penelitian ini dan Sonu Sharma membuktikan bahwa dengan adanya penambahan sirip vertikal (*multiple quarter blades*) membuat C_p atau daya kinerja turbin angin *savonius* menjadi meningkat.

Pemilihan jumlah sirip vertikal dengan sudu utama turbin yang tepat sangat diperlukan untuk menghasilkan nilai koefisien daya rata-rata yang maksimal. Bertambahnya jumlah sirip vertikal akan membuat jarak antar sirip vertikal dengan sudu utama turbin semakin rapat. Penyempitan jarak antar sudu akan menyebabkan angin yang menumbuk sudu turbin tidak dapat mengalir melewati celah antara sirip dan sudu utama. Turbulensi udara yang melewati turbin akan meningkat dan menyebabkan tekanan balik, sehingga menyebabkan turbin akan mengalami penurunan kinerja dengan ditandai menurunnya koefisien daya. Seperti pada Gambar 4.7, dimana penambahan 2 sirip vertikal kinerjanya lebih rendah sedikit dibawah dari kinerja turbin angin *savonius* L dengan penambahan 1 sirip vertikal pada TSR 1. Dimana, penambahan 2 sirip vertikal memiliki C_p 0,354 sedangkan penambahan 1 sirip vertikal 0,355.

4.3. Analisa Kontur Kecepatan dan Kontur Intensitas Turbulensi Turbin Angin *Savonius* L

Simulasi ini menggunakan ANSYS selain dapat menganalisis secara numerik juga dapat menganalisis secara visual. Keunggulan dari turbin *savonius* L adalah konfigurasi sudu yang sederhana. Di sisi lain, turbin *savonius* L

menghasilkan torsi yang lebih rendah daripada turbin angin sumbu vertikal yang lainnya. Hal inilah yang membuat nilai C_p turbin angin *savonius* L lebih rendah dari turbin angin *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) lainnya. Penambahan sirip vertikal merupakan modifikasi untuk turbin *savonius* L. Hasil yang didapatkan adalah peningkatan torsi sehingga C_p dari *savonius* L pun lebih baik.



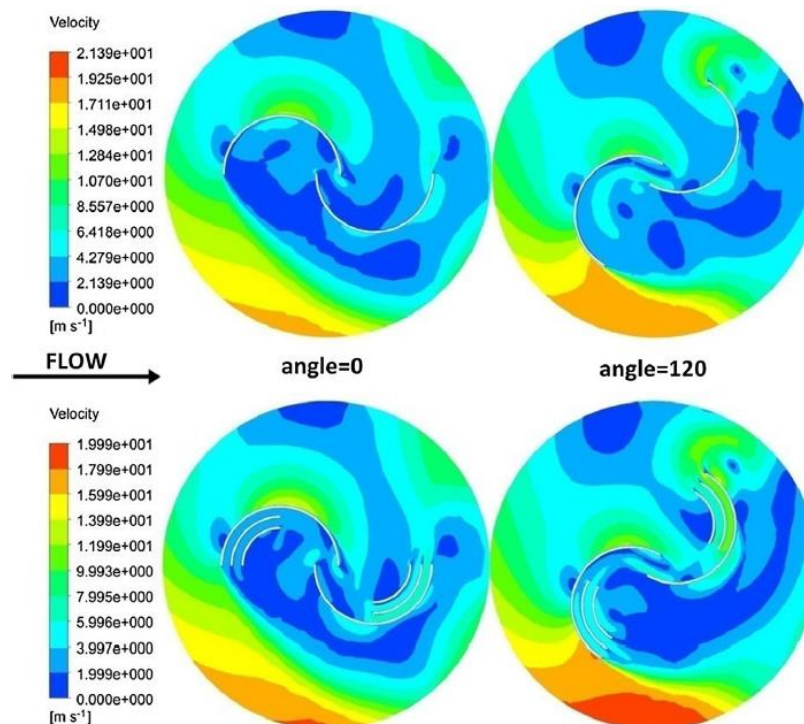
Gambar 4.8. Kontur Kecepatan Turbin *Savonius* L dengan variasi: (a) Tanpa sirip vertikal (b) 1 sirip vertikal, dan (c) 2 sirip vertikal.

Analisis visual sangat membantu penelitian ini untuk mengetahui seberapa energi angin yang dapat diserap oleh turbin angin *savonius* L. Bukan hanya itu, analisa secara visual dapat mengetahui bagaimana arah dari angin yang melewati sudu turbin maupun di sela-sela antar sirip vertikal. Gambar 4.8 menunjukkan kontur kecepatan hasil pemodelan turbin angin *savonius* L.

Kontur kecepatan merupakan salah satu analisis yang dapat dilihat pada ANSYS. Kontur kecepatan menunjukkan bagaimana seberapa cepat aliran angin yang mengalir pada turbin angin *savonius* L. Turbin dengan penambahan sirip

memiliki area penyerapan kecepatan udara yang lebih luas dibanding dengan turbin tanpa penambahan sirip vertikal. Gambar 4.8 dapat dianalisis besarnya kecepatan pada saat aliran angin menumbuk turbin angin *savonius* L dengan variasi penambahan sirip.

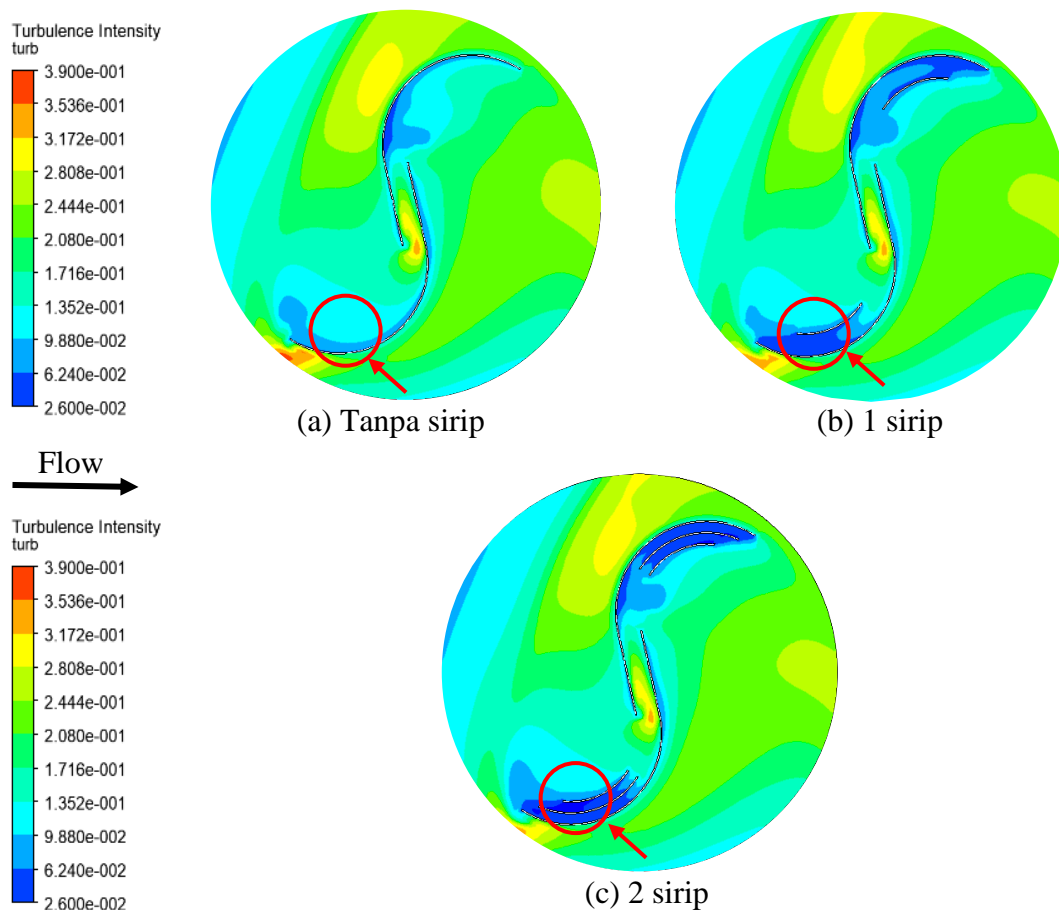
Penambahan sirip vertikal membuat semakin bertambahnya area penyerapan energi angin, sehingga semakin efektif pula untuk mendorong turbin angin *savonius* L. Hal ini dapat dilihat dari warna vektor yang semakin cerah warnanya, kecepatannya semakin tinggi. Selain itu, penambahan sirip vertikal membantu aliran udara yang mengalir melewati *gap* lebih baik dibanding dengan turbin angin tanpa sirip vertikal. Aliran udara lebih efisien mengalir pada *gap* sehingga membantu mendorong bagian *returning blade*. Hal tersebut membuat turbin angin *savonius* L dengan penambahan sirip vertikal memiliki nilai C_p dan C_m lebih besar.



Gambar 4.9. Kontur Kecepatan Turbin Angin *Savonius* Konvensional dan Modifikasi Baru [6].

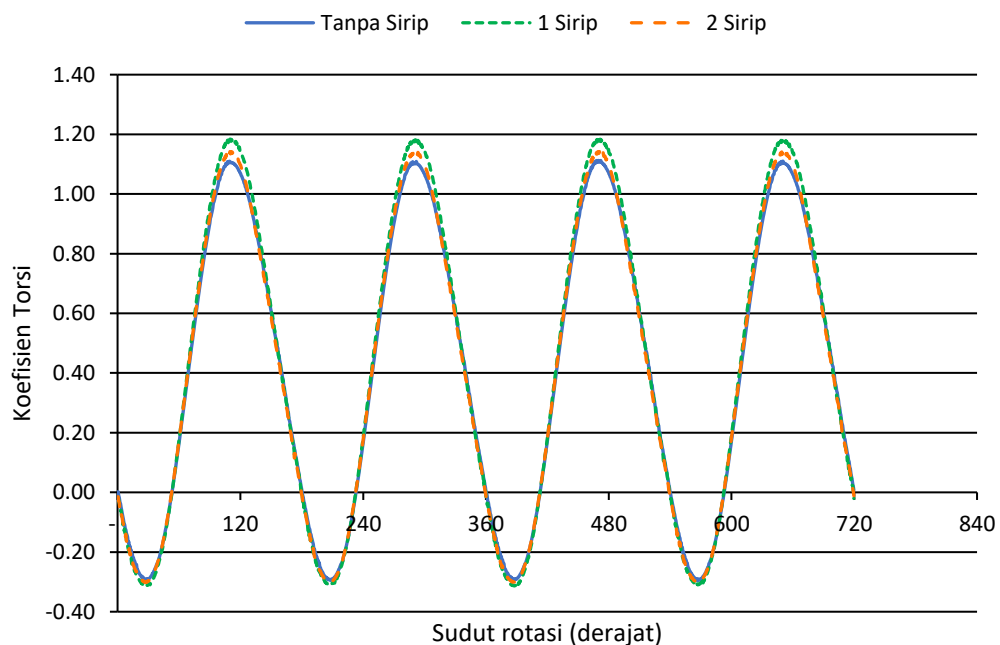
Dapat dilihat pada Gambar 4.8 bahwa dengan melihat warna dari kontur kecepatan dapat dibandingkan ketiga variasi yaitu tanpa sirip, 1 sirip, dan 2 sirip vertikal. Semakin cerah warna kontur maka energi angin yang dapat diserap oleh turbin semakin banyak. Penambahan sirip vertikal baik yang 1 sirip maupun 2 sirip vertikal memiliki warna kontur kecepatan yang lebih cerah pada sudu turbin

dibandingkan tanpa penambahan sirip vertikal. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan 1 sirip vertikal maupun 2 sirip vertikal membuat aliran udara yang diserap sudu cekung (*advancing blade*) memiliki distribusi kecepatan yang lebih tinggi dibanding tanpa penambahan sirip vertikal. Warna yang lebih cerah menunjukkan penyerapan energi aliran udara yang lebih baik. Sehingga nilai C_p dan C_m dari turbin angin *savonius* L dengan penambahan sirip lebih besar dibanding tanpa penambahan sirip vertikal. Namun pada turbin angin *savonius* L dengan penambahan 2 sirip vertikal memiliki jarak antar sirip yang lebih rapat. Hal tersebut membuat penyempitan area penyerapan atau menghambat aliran udara yang membuat penyerapan energi kurang maksimum. Analisis pada Gambar 4.8 bisa selaras dengan penelitian Sonu Sharma pada Gambar 4.9, dimana pada penambahan *multiple quarter blades* kontur kecepatan yang dihasilkan memiliki warna yang lebih cerah pada saat aliran angin melewati sudu turbin.



Gambar 4.10. Kontur Intensitas Turbulensi Turbin *Savonius* L dengan variasi: (a) Tanpa sirip vertikal (b) 1 sirip vertikal, dan (c) 2 sirip vertikal.

Cara lain untuk menganalisa performa turbin angin *savonius* L dengan penambahan sirip dapat dilihat dari kontur intensitas turbulensi. Gambar 4.10 merupakan kontur intensitas turbulensi hasil simulasi turbin angin *savonius* L dengan variasi penambahan sirip vertikal. Turbulensi adalah gerakan partikel yang sangat tidak teratur dalam suatu aliran fluida yang sangat sulit untuk diperkirakan gerakannya. Semakin meningkatnya intensitas turbulensi maka fluktuasi kecepatan turbulen juga semakin besar. Hal tersebut berdampak pada aliran yang menjadi tidak teratur. Bisa dilihat pada Gambar 4.10 turbin dengan penambahan sirip dapat mengurangi intensitas turbulensi yang mengalir di permukaan sudu, sehingga aliran yang melewati sudu menjadi *smooth*. Oleh karena itu, pergerakan aliran yang melewati *gap* akan semakin baik dengan ditandai bertambahnya torsi positif.

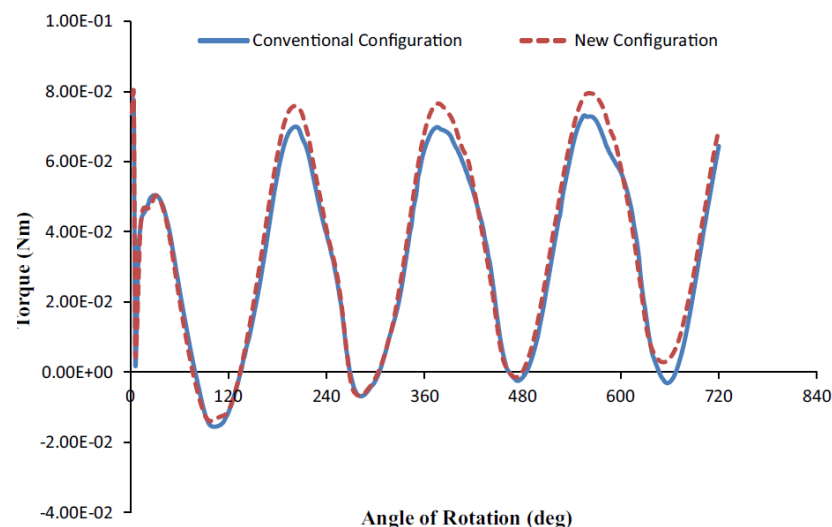


Gambar 4.11. Variasi Koefisien Torsi Terhadap Sudut Rotasi Turbin Angin *Savonius* L.

Turbin angin *savonius* menggunakan energi kinetik fluida untuk dijadikan gaya dorong pada sudu turbin. Torsi yang bekerja pada sudu cekung (*advancing blade*) lebih banyak dibanding sudu cembung (*returning blade*). Hal ini membuktikan bahwa torsi positifnya lebih banyak.

Gambar 4.11 merupakan grafik perbandingan antara ketiga variasi: tanpa sirip, 1 sirip, dan 2 sirip vertikal pada 2 kali rotasi turbin angin (720°). Hasilnya

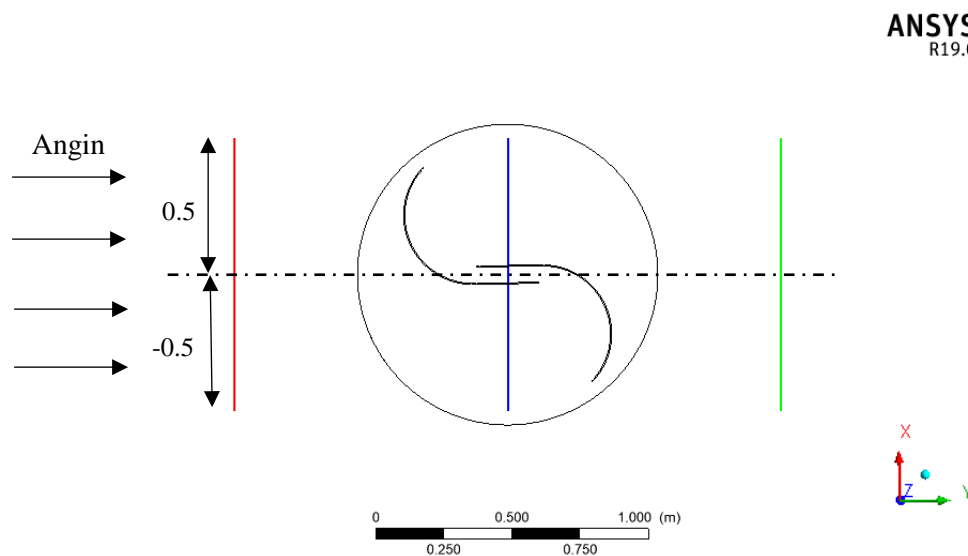
adalah turbin angin dengan penambahan 1 sirip vertikal memiliki tren grafik yang paling baik dibandingkan dengan tanpa sirip maupun 2 sirip vertikal. Dapat dilihat dengan jelas penambahan sirip vertikal membuat kinerja turbin *savonius* L menjadi meningkat. Hal ini membuktikan bahwa terjadi peningkatan torsi yang dihasilkan dari turbin angin dengan penambahan sirip vertikal. Meskipun memiliki jumlah sirip vertikal yang lebih sedikit, turbin dengan penambahan 1 sirip vertikal menghasilkan torsi positif yang lebih banyak. Hal tersebut menunjukkan bahwa turbin angin dengan penambahan 1 sirip vertikal memiliki nilai C_m dan C_p yang lebih baik. Penambahan area (sirip vertikal) pada sudu cekung membuat penyerapan energi kinetik semakin meningkat, sehingga menambah torsi positif yang diterima turbin. Sama halnya dengan penelitian Sonu Sharma, Gambar 4.12 menunjukkan grafik torsi yang diserap oleh turbin angin *savonius* konvensional dan modifikasi *multiple quarter blades*. Torsi yang dihasilkan dengan adanya *multiple quarter blades* lebih baik dibandingkan turbin angin *savonius* konvensional.



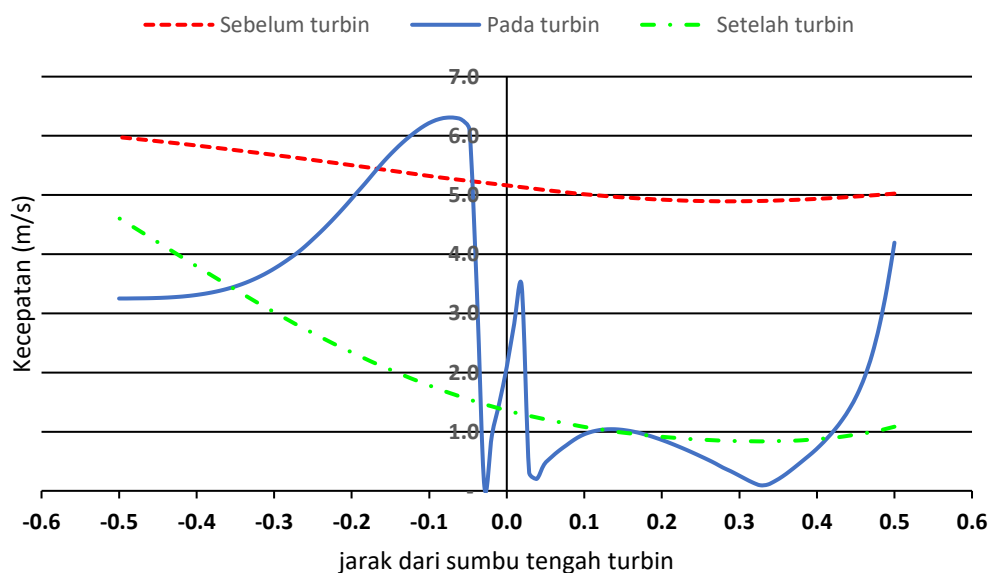
Gambar 4.12. Variasi Koefisien Torsi Terhadap Sudut Rotasi Turbin Angin *Savonius* Konvensional [6].

Grafik di atas memiliki tren sinusoidal. Hal ini dapat dijelaskan pada distribusi kecepatan yang dapat ditunjukkan oleh Gambar 4.13-4.14. Kecepatan udara sebelum mengenai turbin memiliki kecepatan yang paling tinggi karena energi angin belum diserap oleh turbin. Saat energi angin diserap oleh turbin kecepatan angin membentuk tren sinusoidal. Gambar vektor dan kontur kecepatan menunjukkan bagian cekung sudu turbin menerima energi angin yang paling besar

dibanding bagian sudu cembung. Hal ini membuat kecepatan dibagian cekung sudu turbin lebih tinggi. Di sisi lain, kecepatan pada sisi cembung sudu turbin terpecah menjadi 2 arah yaitu pada arah cekung dan keluar turbin. Setelah energi angin diserap oleh turbin dapat dilihat pada Gambar 4.14 bahwa kecepatan angin lebih rendah dibandingkan sebelum diserap oleh turbin. Dengan mengetahui fenomena kecepatan dibagian sudu cekung yang perlu dimaksimalkan. Penambahan sirip vertikal ini sangat tepat untuk menambah kinerja dari turbin angin *savonius* L.



Gambar 4.13. Posisi Garis Pengambilan Data Kecepatan.



Gambar 4.14. Hubungan Kecepatan Angin dengan Jarak dari Pusat Turbin.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa data bagaimana pengaruh penambahan sirip vertikal pada turbin angin *savonius* L dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai C_p mengalami kenaikan mulai dari TSR 0,4-0,8 dan mencapai puncak pada TSR 1, setelah itu kemudian mengalami penurunan pada TSR 1,2.
2. Hasil simulasi didapatkan nilai C_p turbin angin *savonius* L dengan penambahan 1 sirip vertikal memiliki peningkatan sebesar 8,81% pada TSR 1 dibandingkan dengan turbin angin tanpa penambahan sirip vertikal.

5.2. Saran

Simulasi penambahan sirip vertikal terhadap performa turbin angin *savonius* L merupakan bahasan yang menarik, sehingga diharapkan simulasi ini mampu dilanjutkan ke tahap simulasi 3D atau dibuat eksperimen dengan barang jadi. Penelitian selanjutnya dapat juga melakukan simulasi dengan variasi yang lain, seperti variasi *gap* yang membantu udara mengalir diantara sudu dan mendorong pada sudu cembung ataupun *multi stage* dengan posisi sudut berbeda sehingga torsi negatif dapat dikurangi.

DAFTAR PUSTAKA

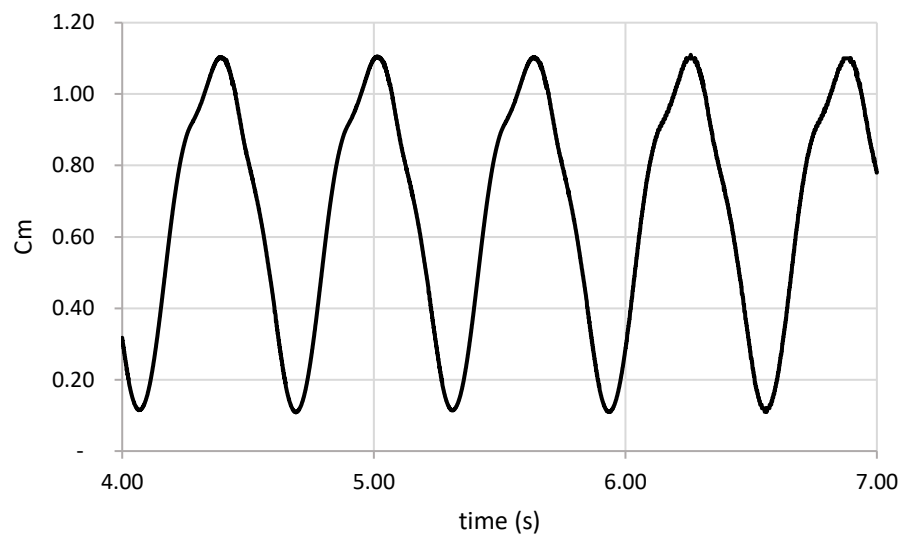
- [1] P. Edi, *Outlook Energy Indonesia 2016*, Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2016.
- [2] F. Syifaul, "Rancangan Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) "Savonius L Modified" Untuk Penerangan Rumah," *Prosiding Sentia*, vol. 6, 2014.
- [3] Q. a. Li, T. Maeda, Y. Kamada, T. Ogasawara, A. Nakai, and T. Kasuya, "Investigation of power performance and wake on a straight-bladed vertical axis wind turbine with field experiments," *Energy*, vol. 141, pp. 1113-1123, 2017.
- [4] S. Roy, and A. Ducoin, "Unsteady analysis on the instantaneous forces and moment arms acting on a novel Savonius-style wind turbine," *Energy Conversion and Management*, vol. 121, pp. 281-296, 2016.
- [5] S. Roy, and U. K. Saha, "Numerical investigation to assess an optimal blade profile for the drag based vertical axis wind turbine." pp. V06AT07A084-V06AT07A084.
- [6] S. Sharma, and R. K. Sharma, "Performance improvement of Savonius rotor using multiple quarter blades – A CFD investigation," *Energy Conversion and Management*, vol. 127, pp. 43-54, 2016.
- [7] M. Kamoji, S. Kedare, and S. Prabhu, "Experimental investigations on single stage, two stage and three stage conventional Savonius rotor," *International journal of energy research*, vol. 32, no. 10, pp. 877-895, 2008.
- [8] J. V. Akwa, G. Alves da Silva Júnior, and A. P. Petry, "Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics," *Renewable Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 141-149, 2012.
- [9] A. Ramadan, K. Yousef, M. Said, and M. Mohamed, "Shape Optimization and Experimental Validation of a Drag Vertical Axis Wind Turbine," *Energy*, 2018.
- [10] M. A. Kamoji, S. B. Kedare, and S. V. Prabhu, "Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor," *Applied Energy*, vol. 86, no. 7-8, pp. 1064-1073, 2009.

- [11] K. Kacprzak, G. Liskiewicz, and K. Sobczak, "Numerical investigation of conventional and modified Savonius wind turbines," *Renewable Energy*, vol. 60, pp. 578-585, 2013.
- [12] I. Rizkiani, S. Subchan, and S. Wahyudi, "Analisis dan Simulasi Konversi Energi Angin Menjadi Energi Listrik Menggunakan Metode Feedback Linearization Control," *Jurnal Sains dan Seni ITS*, vol. 1, no. 1, pp. A12-A17, 2012.
- [13] O. Anaya-Lara, N. Jenkins, J. B. Ekanayake, P. Cartwright, and M. Hughes, *Wind energy generation: modelling and control*: John Wiley & Sons, 2011.
- [14] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind energy explained: theory, design and application*: John Wiley & Sons, 2010.
- [15] I. Dobrev, and F. Massouh, "CFD and PIV investigation of unsteady flow through Savonius wind turbine," *Energy Procedia*, vol. 6, pp. 711-720, 2011.
- [16] I. Dobrev, and F. Massouh, "Exploring the flow around a Savonius wind turbine."
- [17] A. R. Jha, *Wind turbine technology*: CRC press, 2010.
- [18] S. Mathew, *Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics*: Springer, 2006.
- [19] E. Aymane, H. Darhmaoui, and N. Sheikh, "Savonius Vertical Wind Turbine: Design, Simulation, and Physical Testing," 2017.
- [20] E. Hau, and H. von Renouard, *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*: Springer, 2003.
- [21] M. M. Aslam Bhutta, N. Hayat, A. U. Farooq, Z. Ali, S. R. Jamil, and Z. Hussain, "Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 4, pp. 1926-1939, 2012.
- [22] M. H. A. Mohamed, "Design optimization of savonius and wells turbines," *Ottovon-Guericke University Magdeburg*, 2011.
- [23] T. N. Reksoatmodjo, "Vertical-Axis Differential Drag Windmill," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 6, no. 2, pp. pp. 65-70, 2005.

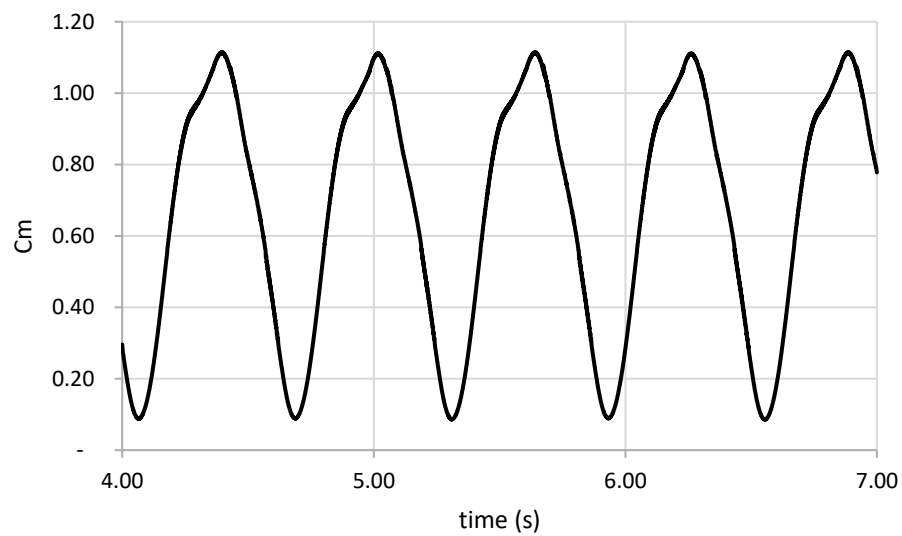
- [24] K. Ajao, and J. Adeniyi, "Comparison of Theoretical and Experimental Power output of Small 3-bladed Horizontal-axis Wind Turbine," *Journal of American Science*, vol. 5, no. 4, pp. 79-90, 2009.
- [25] H. Doddy, "CFD Analysis of The Viscous Resistance of A Staggered Demihulls Catamaran," 2014.
- [26] C. ANSYS, "Training Manual, Vol. 124, ANSYS," Inc, 2006.
- [27] B. Andersson, R. Andersson, L. Håkansson, M. Mortensen, R. Sudiyo, and B. Van Wachem, *Computational fluid dynamics for engineers*: Cambridge University Press, 2011.

LAMPIRAN

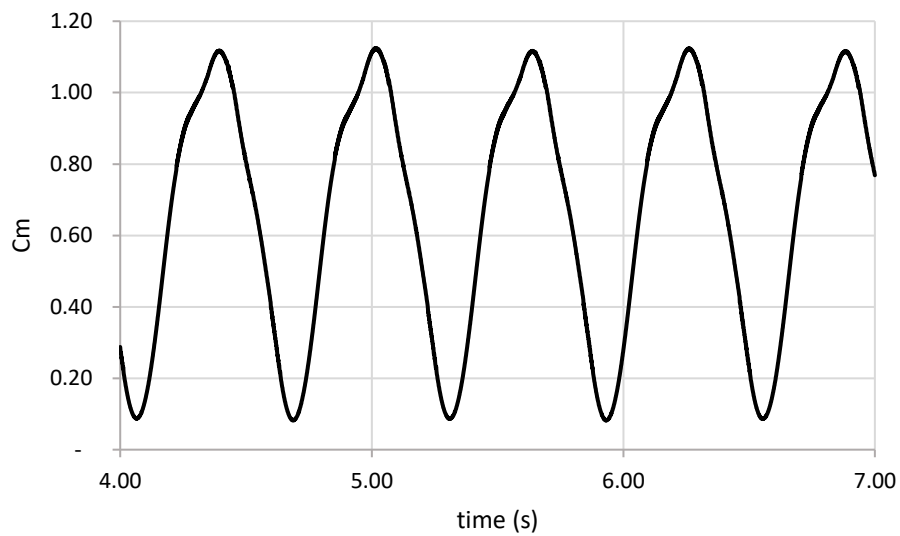
Lampiran 1. Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 0,4



Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 0,4 Tanpa Penambahan Sirip Vertikal

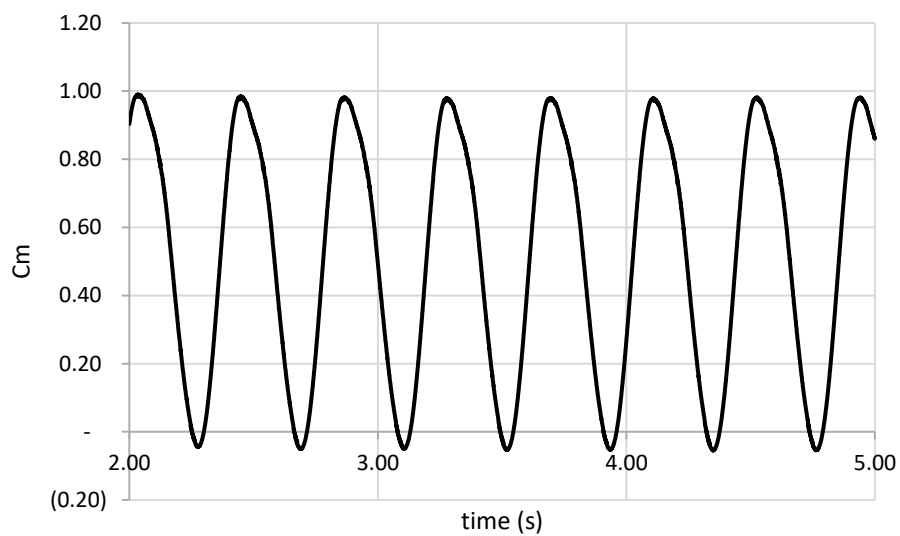


Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 0,4 pada Penambahan 1 Sirip Vertikal

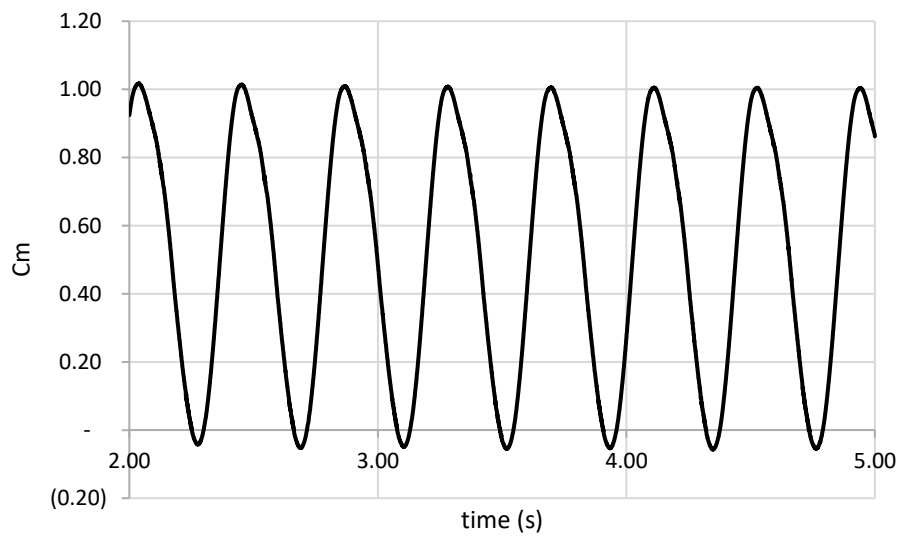


Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 0,4 pada Penambahan 2 Sirip Vertikal

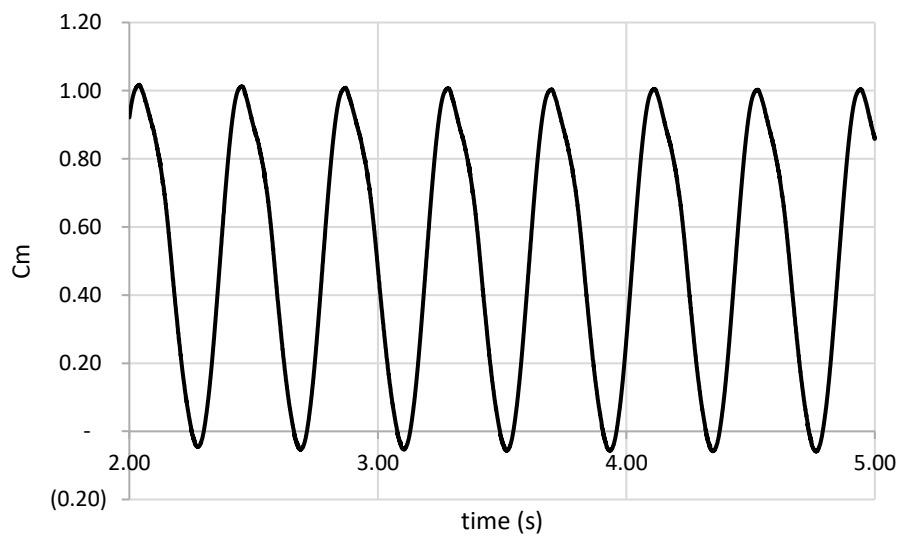
Lampiran 2. Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 0,6



Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 0,6 Tanpa Penambahan Sirip Vertikal

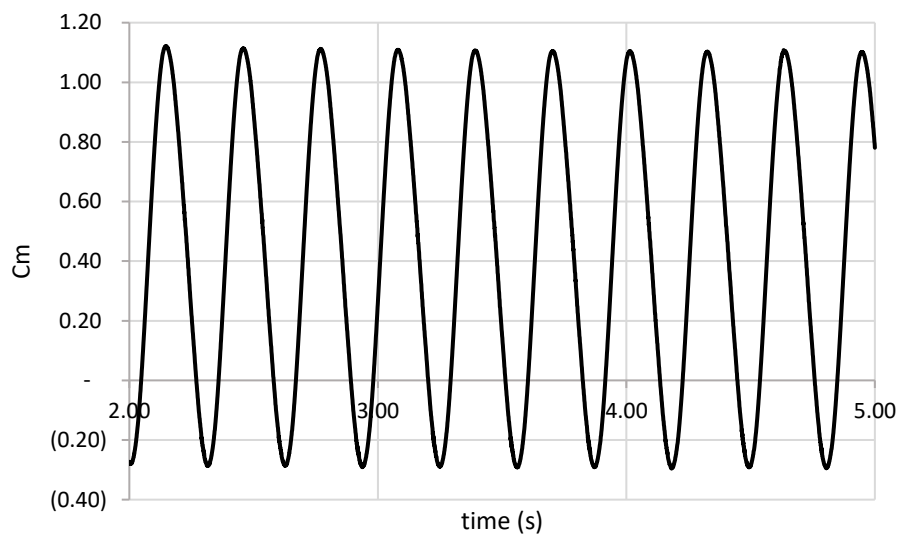


Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 0,6 pada Penambahan 1 Sirip Vertikal

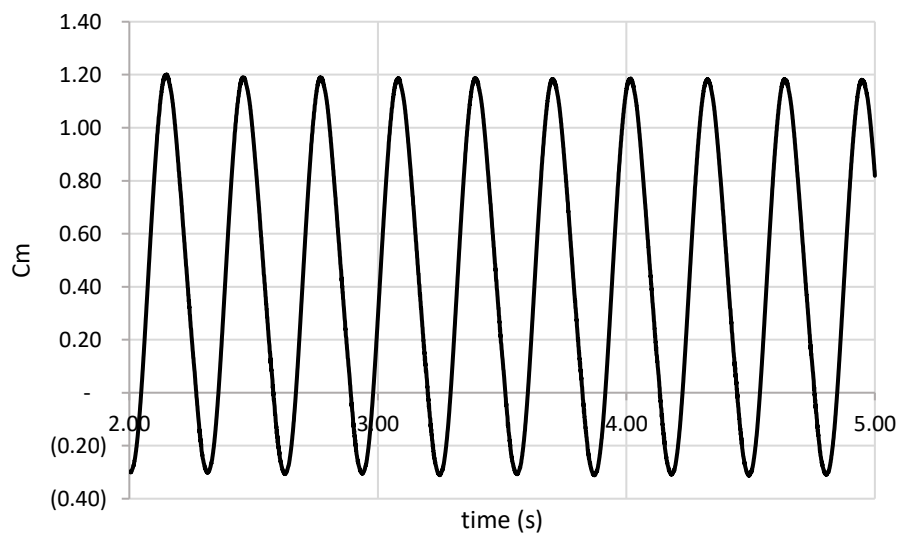


Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 0,6 pada Penambahan 2 Sirip Vertikal

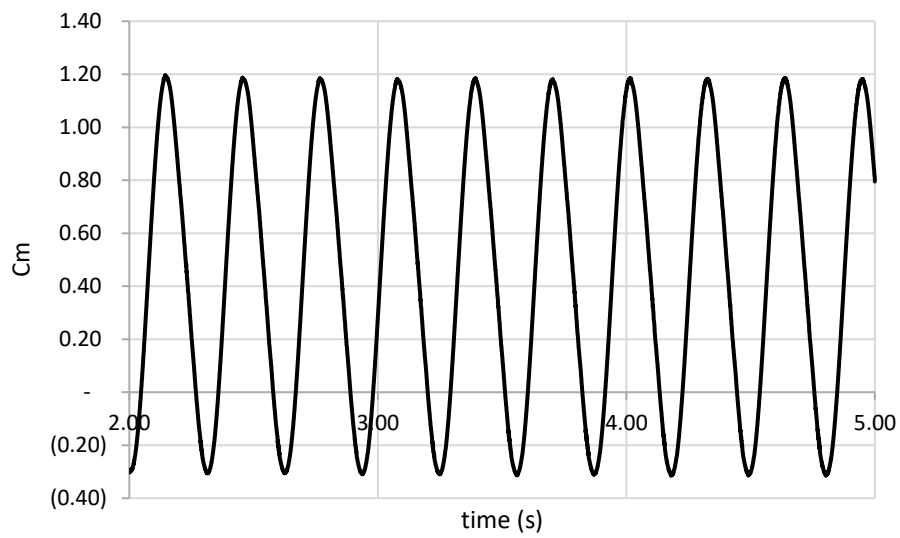
Lampiran 3. Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 0,8



Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 0,8 Tanpa Penambahan Sirip Vertikal

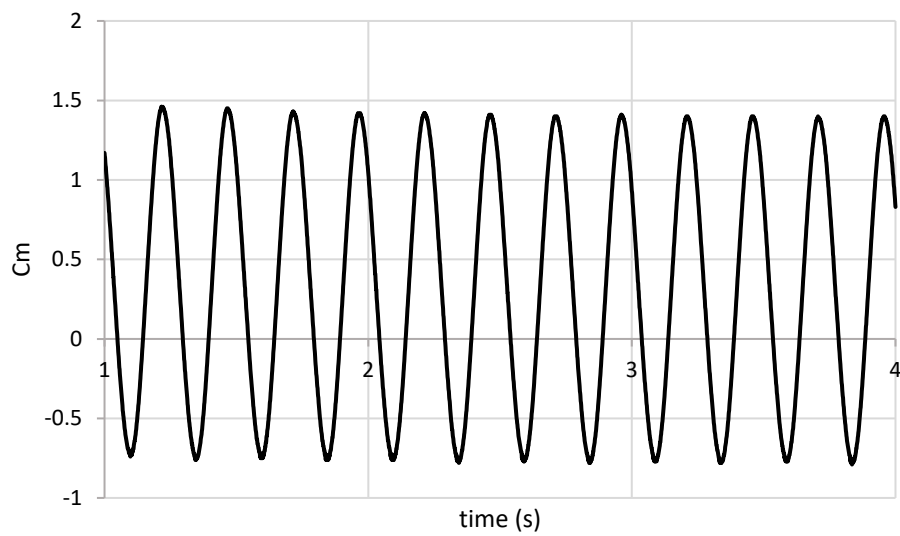


Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 0,8 pada Penambahan 1 Sirip Vertikal

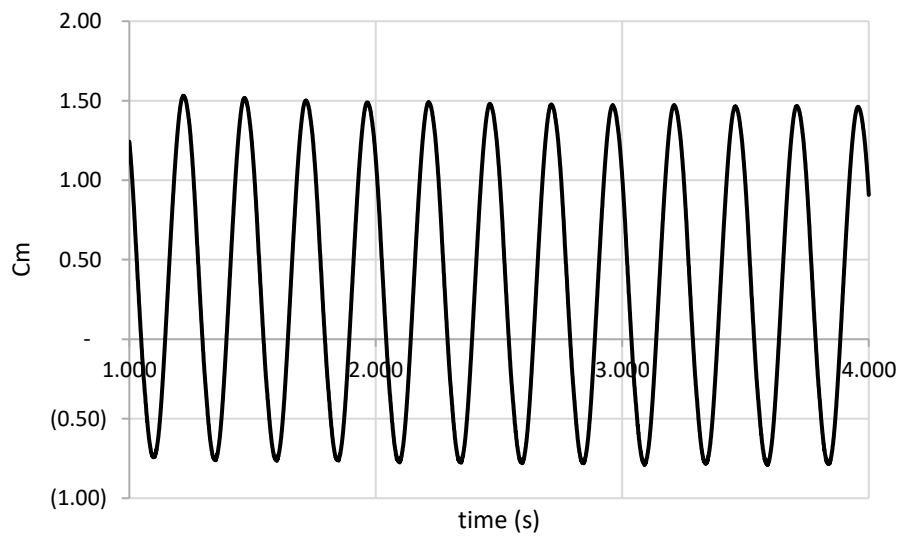


Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 0,8 pada Penambahan 2 Sirip Vertikal

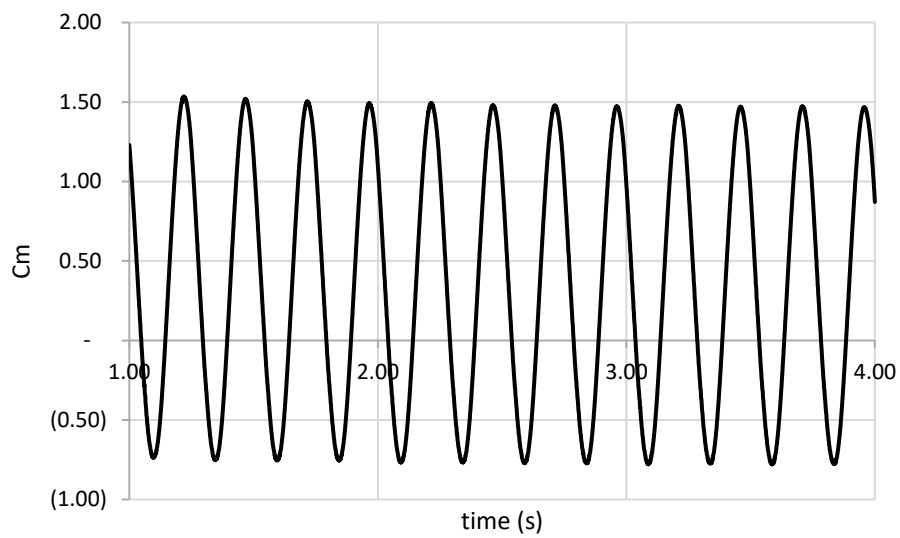
Lampiran 4. Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 1,0



Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 1,0 Tanpa Penambahan Sirip Vertikal

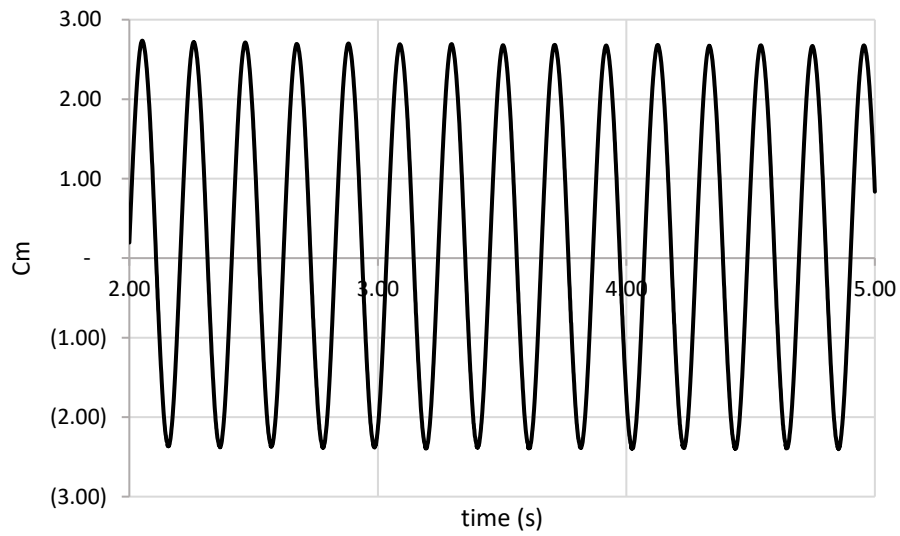


Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 1,0 pada Penambahan 1 Sirip Vertikal

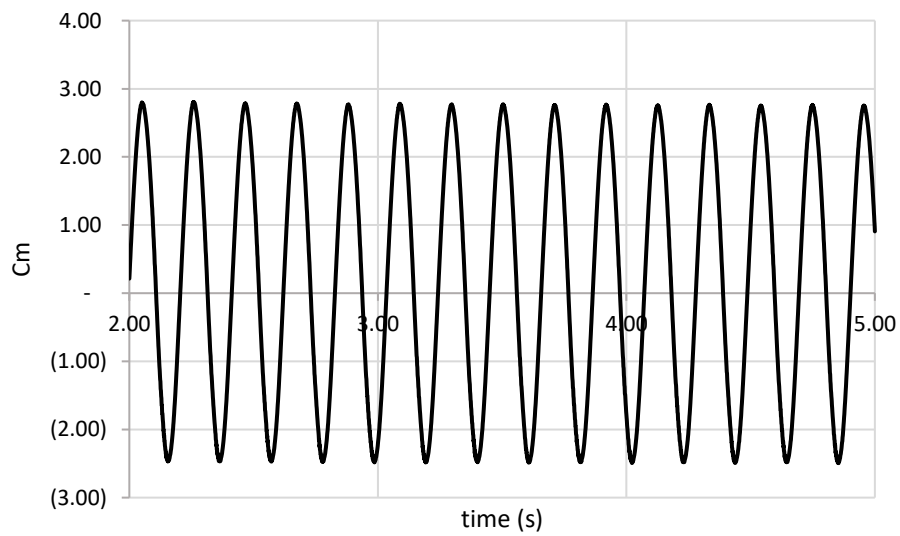


Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 1,0 pada Penambahan 2 Sirip Vertikal

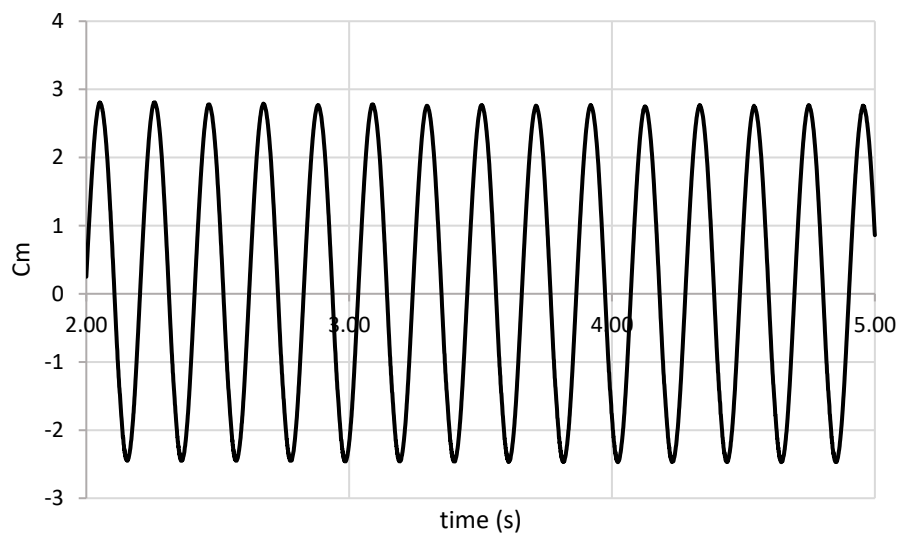
Lampiran 5. Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 1,2



Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 1,2 Tanpa Penambahan Sirip Vertikal

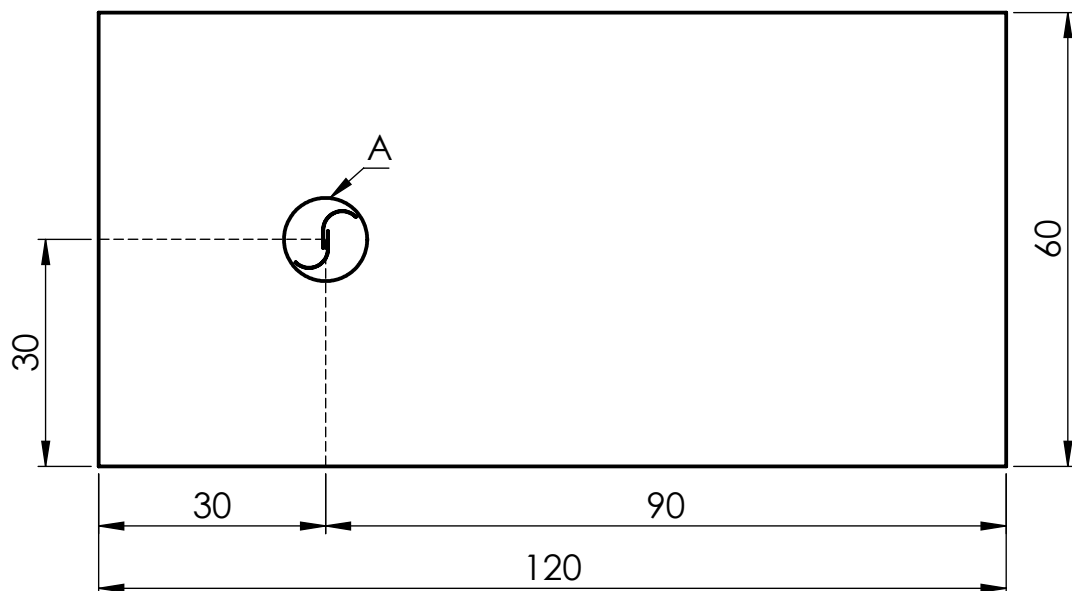
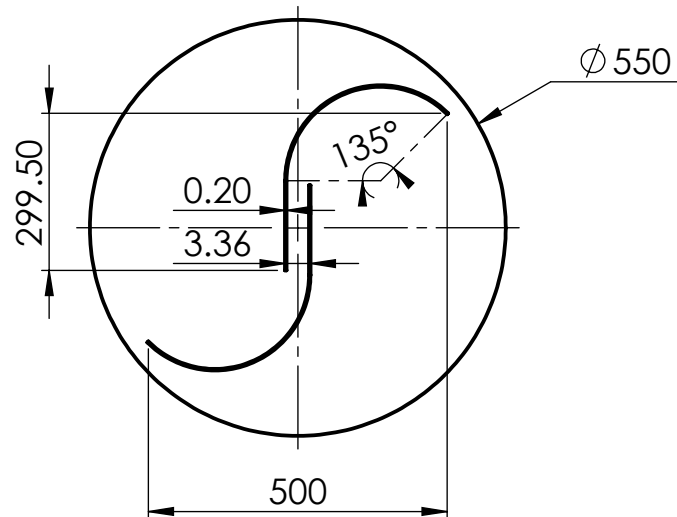


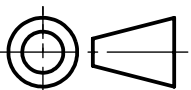
Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 1,2 pada Penambahan 1 Sirip Vertikal



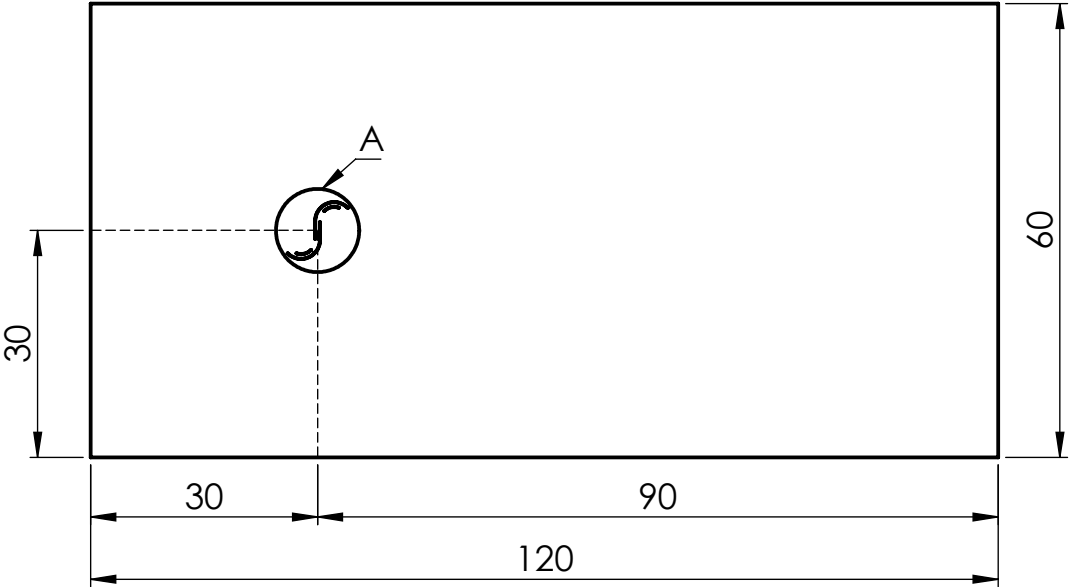
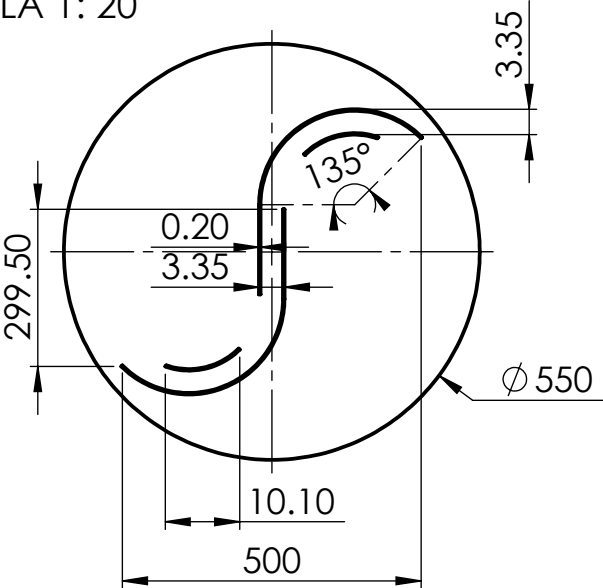
Grafik Nilai C_m terhadap *Flow Time* dengan *Tip Speed Ratio* (TSR) 1,2 pada
Penambahan 2 Sirip Vertikal

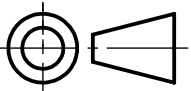
DETAIL A
SKALA 1: 20

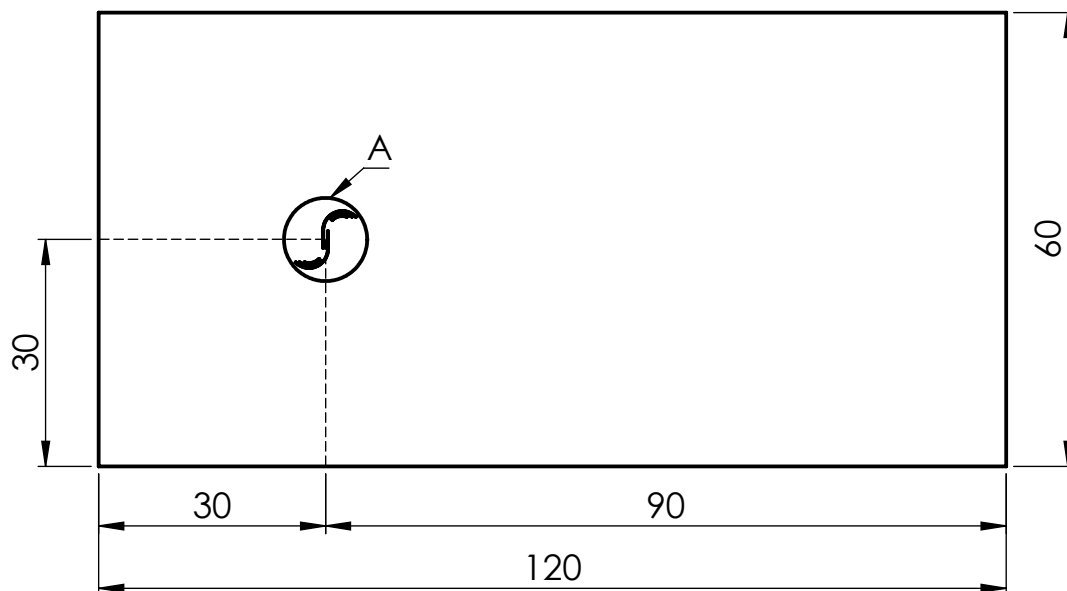
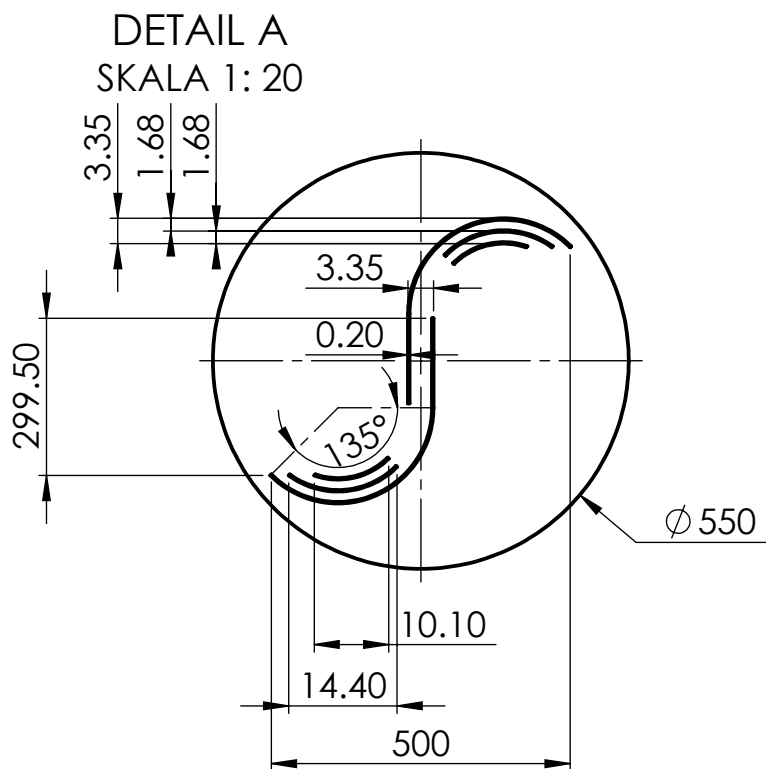


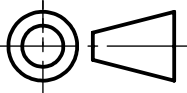
	SKALA : 1 : 200	DIGAMBAR : SATRIO TRI JAYANTO	PERINGATAN :	
	SATUAN : mm	DEPT. : ST MESIN UNS		
	TANGGAL : 31-10-2008	DILIHAT : D. DANARDONO		
UNIVERSITAS SEBELAS MARET	DOMAIN VARIASI TANPA SIRIP		001	A4

DETAIL A
SKALA 1: 20



	SKALA : 1 : 200	DIGAMBAR : SATRIO TRI JAYANTO	PERINGATAN :	
	SATUAN : mm	DEPT. : ST MESIN UNS		
	TANGGAL : 31-10-2008	DILIHAT : D. DANARDONO		
UNIVERSITAS SEBELAS MARET	DOMAIN VARIASI 1 SIRIP		002	A4



	SKALA : 1 : 200	DIGAMBAR : SATRIO TRI JAYANTO	PERINGATAN :	
	SATUAN : mm	DEPT. : ST MESIN UNS		
	TANGGAL : 31-10-2008	DILIHAT : D. DANARDONO		
UNIVERSITAS SEBELAS MARET	DOMAIN VARIASI 2 SIRIP		003	A4